

TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENALAN OPTIMAL *POWER SYSTEM STABILIZER*
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PACITAN
MENGUNAKAN *HYBRID ADAPTIVE CHAOTIC*
DIFFERENTIAL EVOLUTION DAN REDUKSI JARINGAN
BERBASIS RUGI SALURAN**

DHENY ASHARI HS
NRP 2212100054

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENALAAN OPTIMAL *POWER SYSTEM STABILIZER*
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PACITAN
MENGUNAKAN *HYBRID ADAPTIVE CHAOTIC*
DIFFERENTIAL EVOLUTION DAN REDUKSI JARINGAN
BERBASIS RUGI SALURAN**

Dheny Ashari HS
NRP 2212100054

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**Optimal Tuning Power System Stabilizer Pacitan Steam
Power Plant Using Hybrid Adaptive Chaotic Differential
Evolution and Network Reduction based on Losses
Concept**

Dheny Ashari HS
NRP 2212100054

Supervisors
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Industry Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Penalaan *Optimal Power System Stabilizer* Pembangkit Listrik Tenaga Uap Pacitan Menggunakan *Hybrid Adaptive Chaotic Differential Evolution* dan Reduksi Jaringan Berbasis Rugi Saluran”** adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2017



Dheny Ashari HS
2212100054

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENALAAAN OPTIMAL *POWER SYSTEM STABILIZER*
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP PACITAN
MENGUNAKAN *HYBRID ADAPTIVE CHAOTIC*
DIFFERENTIAL EVOLUTION DAN REDUKSI
JARINGAN BERBASIS RUGI SALURAN**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Prof. Dr. Ir. Adi Soepriyanto, MT.
NIP. 19640405 199002 1 001**

**Ir. Ni Ketut Arvani, MT.
NIP. 19650901 199103 2 002**

**SURABAYA
JANUARI, 2017**

Penalaan Optimal *Power System Stabilizer* Pembangkit Listrik Tenaga Uap Pacitan Menggunakan *Hybrid Adaptive Chaotic Differential Evolution* dan Reduksi Jaringan Berbasis Rugi Saluran

Dheny Ashari HS
2212100054

Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dosen Pembimbing II : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

Abstrak :

Ketidakstabilan pada suatu generator mampu menyebabkan pemadaman total pada suatu system tenaga listrik, seperti yang terjadi pada PLTU Pacitan, Senin, 12 Mei 2014. Sayangnya, analisa kestabilan dinamik masih sering menggunakan model SMIB yang hanya fokus mengamati 1 mesin saja. Dalam beberapa penelitian terakhir, analisa kestabilan dinamik multi mesin dilakukan dengan terlebih dahulu mereduksi system multi mesin menjadi single mesin. Metode reduksi jaringan yang umum digunakan adalah metoda konvensional seperti REI - Dimo, *Ward Equivalent*, dan *Cohenrency Equivalent*. Metode reduksi yang lebih baru menggunakan rugi-rugi jaringan untuk mendapatkan nilai impedansi ekuivalen saluran antara generator dengan bus tak berhingga. Metode baru ini menawarkan proses kalkulasi yang sederhana dibandingkan metode yang lain. Namun, metode baru ini memiliki kelemahan seperti, tidak terjaminnya konvergensi dan tidak merepresentasikan operating point mesin. Oleh karena itu, untuk mengatasi permasalahan tersebut dilakukan pendekatan reduksi menggunakan *power flow tracing* untuk menentukan kontribusi generator pada sistem secara utuh.

Model SMIB hasil reduksi digunakan sebagai dasar penalaan *power system stabilizer*. PSS mampu meningkatkan redaman osilasi jika ditala secara optimal. Untuk mendapatkan penalaan dan redaman optimal, digunakan pendekatan optimasi *hybrid adaptive chaotic differential evolution* (HACDE). Metode optimasi DE merupakan metode yang unik, sederhana, handal, dan cepat konvergen. Analisa eigenvalue *multi-objective* digunakan sebagai fungsi objektif metode optimasi HACDE.

Berdasarkan simulasi, metode *power flow tracing* lebih unggul dibandingkan metode superposisi dalam hal mencari kerugian saluran akibat kontribusi daya sebuah generator. Kemudian, berdasarkan hasil simulasi penalaan parameter PSS pada Generator Pacitan Sistem Transmisi 150kV Jawa Tengah didapatkan urutan metode optimasi yang memiliki nilai fitness menggunakan eigenvalue terbaik, yaitu HACDE (0,869), DE (0,722), RD-PSO (0,686), dan PSO (0,534). Selain itu melalui evaluasi domain waktu menggunakan ITAE didapatkan urutan, yaitu HACDE (12,89), PSO (14,78), DE (16,02), dan RD-PSO (21,21). Oleh karena itu, HACDE lebih unggul untuk mendapatkan nilai optimal parameter PSS guna memberikan redaman optimal pada osilasi Generator Pacitan.

Kata Kunci: *Differential Evolution (DE), Kerugian Jaringan, Kestabilan Dinamik, Power Flow Tracing, PSS, Reduksi Jaringan, SMIB.*

Optimal Tuning Power System Stabilizer Pacitan Steam Plant Using Hybrid Adaptive Chaotic Differential Evolution and Network Reduction based on Losses Concept

Dheny Ashari HS
2212100054

Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
Dosen Pembimbing II : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

Abstract :

Instability in the generator might cause a total blackout in an electric power system, as happened in Pacitan power plant, Monday, May 12, 2014. Unfortunately, dynamic stability analysis is still frequent use SMIB models that focus only observe one machine only. In some recent research, dynamic stability analysis of multi-machine reduces into single-machine. Commonly Network reduction method is used such as REI-Dimo, Ward Equivalent and Equivalent Cohency. Newer reduction method uses network loss to obtain the equivalent impedance between the generator and the infinite bus. This new method offers a simple calculation process compared to the other methods. However, this new method has drawbacks such, it does not guarantee convergence and does not represent the operating point of the machine. Therefore, to overcome these problems, this research offers the new network reduction approach using power flow tracing to determine the contribution of the generator for a whole system.

SMIB model resulted from reduction is used as the basis tuning power system stabilizer. PSS is able to increase the oscillation damping if tuned optimally. To obtain optimal tuning and damping, new optimization approach called hybrid chaotic adaptive differential evolution (HACDE). DE optimization method is a method that is unique, simple, reliable, and fast converging. Multi-objective eigenvalue analysis is used as objective function.

Based on the simulation, the power flow tracing method is superior to superposition method to obtain network loss due to contribution power by a generator. Then, based on simulation results tuning parameter PSS at Pacitan Generator Transmission System 150 kV

Central Java, obtained by optimization method has a fitness value based on eigenvalue, HACDE (0.869), DE (0.722), RD-PSO (0.686) and PSO (0.534). In addition, time domain evaluation uses ITAE obtained, HACDE (12.89), PSO (14.78), DE (16.02), and RD-PSO (21.21). Therefore, HACDE has superior performance to get the optimal parameter PSS to provide optimal damping in Pacitan Generator.

Keywords : *Differential Evolution (DE), Network Loss, Dynamic Stability, Power Flow Tracing, PSS, Network Reduction, SMIB.*

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum.wr.wb

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena berkat rahmat, taufiq dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul **“Penalaan Optimal Power System Stabilizer Pembangkit Listrik Tenaga Uap Pacitan Menggunakan Hybrid Adaptive Chaotic Differential Evolution dan Reduksi Jaringan Berbasis Rugi Saluran”**.

Adapun dalam proses penyusunan Laporan Tugas Akhir ini penulis memperoleh bantuan dan bimbingan serta banyak dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT. selaku dosen pembimbing I atas bimbingan dan ilmu yang sangat banyak dalam pengerjaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini.
2. Ibu Ir. Ni Ketut Aryani, MT. selaku dosen pembimbing II atas bimbingan dan ilmu yang sangat banyak dalam pengerjaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini.
3. Keluarga Penulis, Bapak Hasan Dani, Ibu Suhartatik dan Adik Devi Nulasari atas motivasi dan doa tiada henti.
4. Segenap dosen jurusan teknik elektro ITS, khususnya dosen bidang teknik sistem tenaga yang telah memberi ilmu pelajaran, kritik, dan masukan selama masa perkuliahan penulis.
5. Teman-teman penulis yaitu Rif'atul Ummah, Ahmad Fariz Thirafi, Fajrin Hernata, Mas Aan, Apathetic, GW17 yang senantiasa memberi dukungan, doa, maupun bantuan lainnya kepada penulis.
6. Mas Dodik Teguh Arifianto, S.T., yang telah memberikan momen-momen indah sebelum lulus.
7. Teman-teman penulis yaitu Okto Fenno, Yudha Anugerah, Mas Basuki, Mas Vicky, PSSL B103 2012 dan 2013 yang senantiasa memberi dukungan, doa, maupun bantuan lainnya kepada penulis.

8. Teman-teman jurusan teknik elektro ITS angkatan 2012 yang telah memberi dukungan dan semangat dalam penyelesaian laporan ini.
9. Rekan-rekan satu bidang teknik tenaga yang senantiasa berdiskusi dan berbagi ilmu selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
10. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Walaupun jauh dari sempurna harapan saya semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi rekan-rekan sedisiplin ilmu. Penulis juga memohon maaf atas kekurangan yang ada pada laporan ini.
Wassalamualaikum wr. Wb.

Surabaya, Januari 2017



Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
TABLE OF CONTENT	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxiii
DAFTAR LAMPIRAN	xxv

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan Tugas Akhir	2
1.4 Batasan Tugas Akhir	3
1.5 Metodologi Tugas Akhir	3
1.6 Sistematika Laporan	4
1.7 Relevansi	5

BAB II DASAR KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK, REDUKSI JARINGAN, DAN METODE OPTIMASI

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	7
2.1.1 Kestabilan <i>Steady State</i>	7
2.1.2 Kestabilan Transien	7
2.1.3 Kestabilan Dinamik	8
2.2 Model <i>Single Machine Infinite Bus</i> (SMIB)	8
2.2.1 Model Linier Generator	9
2.3 Pemodelan <i>Power System Stabilizer</i>	15
2.4 Reduksi Jaringan Berdasarkan Konsep Kerugian Saluran	17
2.5 <i>Power Flow Tracing</i>	18
2.5.1 Jenis-Jenis <i>Node</i> pada <i>Power Flow Tracing</i> [23]	19
2.6 Metode Optimasi <i>Differential Evolution</i> (DE)	20
2.6.1 Algoritma <i>Differential Evolution</i>	22
2.7 Penalaan Optimal Parameter PSS dengan Metode Optimasi	24
2.8 Persamaan <i>Chaotic</i>	25

BAB III PEMODELAN OPTIMASI PENALAAN PARAMETER PSS MENGGUNAKAN HACDE DAN REDUKSI JARINGAN BERDASARKAN RUGI SALURAN

3.1	Diagram Alur Utama	27
3.2	Sistem Transmisi 150kV Jawa Tengah	28
3.3	Diagram Alir <i>Power Flow Tracing</i>	29
3.3.1	Matriks Aliran Daya (<i>Flow Matrices</i>).....	32
3.3.2	Matriks <i>Net Injection</i>	33
3.3.3	Matriks <i>Passing Flow</i>	33
3.3.4	Matriks Kontribusi	33
3.3.5	Proses <i>Power Flow Tracing</i>	35
3.3.6	Menghitung Kontribusi Kerugian Daya	36
3.4	Impedansi Ekuivalen Berdasarkan <i>Losses Concept</i> [5]	37
3.5	Pemodelan Dinamik Generator	38
3.6	Pemodelan Metode Optimasi Hybrid Adaptive Chaotic-DE.....	40
3.6.1	Penentuan Parameter Masukan Awal.....	44
3.6.2	Inisialisasi Populasi.....	45
3.6.3	Inisialisasi parameter mutasi dan pindah silang	45
3.6.4	Membentuk Populasi Mutasi.....	46
3.6.5	Membentuk Populasi <i>Trial</i>	47
3.6.6	Evaluasi Populasi.....	47
3.6.7	Iterasi <i>Chaotic</i>	47
3.6.8	Iterasi Utama DE.....	48
3.7	Fungsi Objektif [34]	48
3.8	Batasan (<i>Constraint</i>)	49
3.9	Simulasi Domain Waktu [35]	50

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	<i>Power Flow Tracing</i> (PFT).....	51
4.1.1	Kasus A: <i>Power Flow Tracing</i> Berdasarkan Sistem Sederhana 4 bus	51
4.1.2	Kasus B: Sistem Kelistrikan IEEE 5 Bus	51
4.1.3	Kasus C: Sistem Kelistrikan IEEE 6 Bus	55
4.2	Reduksi Jaringan Menggunakan Konsep Kerugian Saluran	62
4.3	Optimasi Parameter PSS	63
4.3.1	Uji Performa HACDE.....	64
4.3.2	Simulasi Domain Waktu	67

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	71
5.2	Saran	72

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

RIWAYAT HIDUP PENULIS

Halaman ini sengaja dikosongkan

TABLE OF CONTENT

COVER PAGE	i
SHEET OF AUTHENTICITY STATEMENT.....	iii
SHEET OF RATIFICATION	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
PREFACE	ix
DAFTAR ISI.....	xi
TABLE OF CONTENT	xv
LIST OF FIGURES	xix
LIST OF TABLES	xxiii
LIST OF ATTACHMENT	xxv

BAB I INTRODUCTION

1.1 Background	1
1.2 Problems	2
1.3 Objective of Final Project	2
1.4 Scope of Final Project	3
1.5 Methodology of Final Project	3
1.6 Systematics Report	4
1.7 Relevancy	5

BAB II POWER SYSTEM STABILITY, REDUCTION NETWORK, AND OPTIMIZATION METHOD

2.1 Power System Stability	7
2.1.1 Steady State Stability	7
2.1.2 Transient Stability	7
2.1.3 Dynamic Stability	8
2.2 Single Machine Infinite Bus (SMIB) Model.....	8
2.2.1 Linear Model of Generator	9
2.3 Power System Stabilizer Modelling.....	15
2.4 Network Reduction Based on Losses Concept.....	17
2.5 Power Flow Tracing	18
2.5.1 Node Types in Power Flow Tracing [23].....	19
2.6 Differential Evolution (DE) Method.....	20
2.6.1 Algorithm of <i>Differential Evolution</i>	22
2.7 Optimal Tuning of PSS Parameters by Optimization Method	24
2.8 Chaotic Equation.....	25

BAB III MODELLING OF OPTIMAL TUNING PSS PARAMETERS USING HACDE AND NETWORK REDUCTION BASED ON LOSSES CONCEPT

3.1	Main Flowchart	27
3.2	150kV Transmission System of Central Java	28
3.3	Power Flow Tracing Flowchart.....	29
3.3.1	Flow Matrices	32
3.3.2	Net Injection Matrices	33
3.3.3	Passing Flow Matrices.....	33
3.3.4	Contribution Matrices.....	33
3.3.5	Power Flow Tracing Process.....	35
3.3.6	Calculation of Power Losses Contribution	36
3.4	Equivalent Impedance Based on Losses Concept [5].....	37
3.5	Dynamic Modelling of Generator.....	38
3.6	Hybrid Adaptive Chaotic-DE Modelling	40
3.6.1	Determination of Initial Input Parameters	44
3.6.2	Initialization of Population	45
3.6.3	Initialization of mutation and Cross Over Parameters ...	45
3.6.4	Generating of Mutation Population	46
3.6.5	Generating of Trial Population.....	47
3.6.6	Evaluation of Population.....	47
3.6.7	Chaotic Iteration	47
3.6.8	Main Iteration of Differential Evolution.....	48
3.7	Objective Function [34].....	48
3.8	Constraints	49
3.9	Time Domain Simulation [35].....	50

BAB IV SIMULATION AND ANALYSIS

4.1	Power Flow Tracing (PFT)	51
4.1.1	Case A: Power Flow Tracing based on 4 bus	51
4.1.2	Case B: IEEE 5 Bus	51
4.1.3	Case C: IEEE 6 Bus	55
4.2	Network Reduction Using Losses Concept.....	62
4.3	Optimization of PSS Parameters.....	63
4.3.1	Benchmark of HACDE.....	64
4.3.2	Time Domain Simulation.....	67

BAB V CLOSURES

5.1 Conclusion	71
5.2 Suggestion	72

BIBLIOGRAPHY

APPENDICES

BIOGRAPHY

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Model <i>Single Machine Infinite Bus</i> (SMIB)	9
Gambar 2.2	Sistem Pembangkit Listrik Secara Umum	9
Gambar 2.3	Dinamika Dasar Generator Sinkron	10
Gambar 2.4	Diagram Blok Governor	13
Gambar 2.5	Diagram Blok Sistem Eksistasi.....	13
Gambar 2.6	Diagram Blok Turbin Uap dan Sistem Pengendalinya	14
Gambar 2.7	Permodelan Linier Generator [10-11]	15
Gambar 2.8	Blok Diagram PSS	16
Gambar 2.9	Jenis-jenis node pada <i>power flow tracing</i>	20
Gambar 2.10	Ilustrasi dasar optimasi 2 dimensi (n=2) [24]	20
Gambar 2.11	Proses pindah silang [25].....	22
Gambar 2.12	Algoritma DE [24].....	23
Gambar 2.13	Diagram alir DE	24
Gambar 3.1	Diagram alir utama	27
Gambar 3.2	Diagram alir <i>power flow tracing</i>	29
Gambar 3.3	Diagram alir <i>power flow tracing</i> lanjutan.....	30
Gambar 3.4	Diagram alir <i>power flow tracing</i> lanjutan.....	31
Gambar 3.5	Contoh matriks aliran daya untuk 4 bus 5 saluran	32
Gambar 3.6	Contoh matriks <i>net flow injection</i>	33
Gambar 3.7	Contoh matriks kontribusi daya aktif	34
Gambar 3.8	Contoh matriks kontribusi daya reaktif.....	35
Gambar 3.9	Contoh matriks kontribusi setelah proses tracing.....	36
Gambar 3.10	Contoh matriks $T_{\text{ kirim, } T_{\text{ terima, dan Loss untuk daya aktif$	37
Gambar 3.11	Model dinamik governor tipe IEEE G1	39
Gambar 3.12	Model dinamik AVR ST4B	39
Gambar 3.13	Model dinamik PSS konvensional.....	39
Gambar 3.14	Model Linier Generator Pacitan	40
Gambar 3.15	Diagram Alir HACDE	41
Gambar 3.16	Diagram Alir HACDE lanjutan	42
Gambar 3.17	Diagram Alir HACDE lanjutan	43
Gambar 3.18	Inisialisasi Populasi pada HACDE	45
Gambar 3.19	Algoritma iterasi <i>chaotic</i>	48
Gambar 4.1	Sistem kelistrikan sederhana 4 bus	52
Gambar 4.2	Matriks faktor kontribusi daya aktif 4 bus sebelum PFT	52

Gambar 4.3	Matriks faktor kontribusi daya reaktif 4 bus sebelum PFT	53
Gambar 4.4	Matriks faktor kontribusi daya aktif 4 bus setelah PFT	53
Gambar 4.5	Matriks faktor kontribusi daya reaktif 4 bus setelah PFT	53
Gambar 4.6	Daya aktif kontribusi sisi kirim 4 bus	53
Gambar 4.7	Daya aktif kontribusi sisi terima 4 bus	54
Gambar 4.8	Kerugian saluran daya aktif hasil PFT 4 bus	54
Gambar 4.9	Daya reaktif kontribusi sisi kirim 4 bus	54
Gambar 4.10	Daya reaktif kontribusi sisi terima 4 bus	54
Gambar 4.11	Kerugian saluran daya reaktif hasil PFT 4 bus	54
Gambar 4.12	Sistem kelistrikan IEEE 5 Bus	55
Gambar 4.13	Matriks faktor kontribusi daya aktif sebelum PFT	56
Gambar 4.14	Matriks faktor kontribusi daya reaktif sebelum PFT	56
Gambar 4.15	Kerugian saluran daya aktif 5 bus hasil PFT	56
Gambar 4.16	Matriks faktor kontribusi daya reaktif 5 bus setelah PFT	56
Gambar 4.17	Daya aktif kontribusi sisi kirim 5 bus	57
Gambar 4.18	Daya aktif kontribusi sisi terima 5 bus	57
Gambar 4.19	Kerugian saluran daya aktif 5 bus hasil PFT	57
Gambar 4.20	Daya reaktif kontribusi sisi kirim 5 bus	57
Gambar 4.21	Daya reaktif kontribusi sisi terima 5 bus	57
Gambar 4.22	Kerugian saluran daya reaktif 5 bus hasil PFT	58
Gambar 4.23	Sistem kelistrikan IEEE 6 Bus	59
Gambar 4.24	Matriks faktor kontribusi daya aktif 6 bus sebelum PFT	59
Gambar 4.25	Matriks faktor kontribusi daya reaktif 6 bus sebelum PFT	60
Gambar 4.26	Matriks faktor kontribusi daya aktif 6 bus setelah PFT	60
Gambar 4.27	Matriks faktor kontribusi daya reaktif 6 bus setelah PFT	60
Gambar 4.28	Daya aktif kontribusi sisi kirim 6 bus	60
Gambar 4.29	Daya aktif kontribusi sisi terima 6 bus	61
Gambar 4.30	Kerugian saluran daya aktif 6 bus hasil PFT	61
Gambar 4.31	Daya reaktif kontribusi sisi kirim 6 bus	61
Gambar 4.32	Daya reaktif kontribusi sisi terima 6 bus	61
Gambar 4.33	Kerugian saluran daya reaktif 6 bus hasil PFT	61

Gambar 4.34	Grafik perbandingan konvergensi metode optimasi ..	64
Gambar 4.35	Letak <i>Pole-Zero</i> Eigenvalue Hasil Penalaan PSS	66
Gambar 4.36	Respon Sudut Rotor Generator Pacitan	67
Gambar 4.37	Respon Kecepatan Rotor Generator Pacitan	68
Gambar 4.38	Respon Tegangan Terminal Generator Pacitan	68
Gambar 4.39	Respon Sudut Rotor Generator Pacitan dengan Gangguan 0,01 p.u ketika 1 detik.....	69
Gambar 4.40	Respon Kecepatan Rotor Generator Pacitan dengan Gangguan 0,01 p.u ketika 1 detik.....	69
Gambar 4.41	Respon Tegangan Terminal Generator Pacitan dengan Gangguan 0,01 p.u ketika 1 detik.....	70

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Jangkauan Tipikal Parameter PSS [24]	49
Tabel 4.1	Hasil Aliran Daya Sistem Sederhana 4 Bus	52
Tabel 4.2	Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 5 Bus	55
Tabel 4.3	Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 6 Bus	59
Tabel 4.4	Perbandingan Metode Reduksi Jaringan	62
Tabel 4.5	Hasil 10 kali <i>Trial Running</i> HACDE dan DE	64
Tabel 4.6	Hasil 10 kali <i>Trial Running</i> RDPSO dan PSO	65
Tabel 4.7	Nilai Parameter PSS Hasil Metode Optimasi	65
Tabel 4.8	Performa Domain Waktu Menggunakan ITAE	66

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data Aliran Daya Sistem Transmisi 150 kV Jawa Tengah	77
Lampiran 2	Hasil Aliran Daya Sistem Transmisi 150 kV Region 3 Jawa Tengah	85
Lampiran 3	Hasil Aliran Daya Sistem Transmisi 150 kV Region 4 Jawa Timur	88
Lampiran 4	Hasil Aliran Daya Sistem Transmisi 150 kV Region 4 Jawa Timur Superposisi PLTU Pacitan	91

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem kelistrikan modern terhubung secara interkoneksi untuk memenuhi kebutuhan beban. Sistem kelistrikan interkoneksi tidak hanya menyediakan daya yang efisien dan ekonomis, tetapi juga meningkatkan kehandalan. Fluktuasi perubahan permintaan daya beban mampu menyebabkan osilasi pada sistem. Osilasi sistem diakibatkan oleh respon generator dalam menanggapi perubahan beban. Osilasi yang tidak teredam, menguat, atau tidak kembali pada kondisi operasi normal sistem disebut ketidakstabilan. Ketidakstabilan pada sistem tenaga mampu menyebabkan kehilangan sinkronisasi pada generator hingga menyebabkan pemadaman pada sistem, seperti yang terjadi pada Senin, 12 Mei 2014, PLTU Pacitan mengalami gangguan kestabilan hingga menyebabkan pemadaman listrik daerah Solo dan sekitarnya [1]. Oleh karena itu, perubahan beban dapat dipandang sebagai permasalahan kestabilan [2-3].

Walaupun sistem interkoneksi menyediakan daya yang efisien dan handal, kestabilan pada sistem interkoneksi tidak mudah dicapai karena interaksi antar generator dan peralatan kontrolnya. Hal ini menyebabkan sistem interkoneksi sulit untuk dianalisa. Model linier *single machine infinite bus* (SMIB) dipilih untuk menyederhanakan analisa dan cukup merepresentasikan pengaturan peralatan kontrol generator [4].

Untuk mengubah sistem multimesin menjadi model SMIB, dibutuhkan perhitungan impedansi ekuivalen generator yang diamati. Metode ekuivalensi saluran yang tergolong baru adalah metode berbasis konsep rugi-rugi saluran [5]. Metode ini mengubah sistem multimesin menjadi *single-machine* sehingga fokus mengamati mesin yang mengalami gangguan. Namun, pada referensi [5-6] memiliki kelemahan yaitu sistem dimodelkan superposisi sehingga tidak merepresentasikan keadaan semula saat multimesin, beban dinormalisasi secara seragam untuk mengatasi *overload* pada generator yang diamati, terkadang hasil aliran daya superposisi tidak konvergen akibat terlalu besarnya impedansi saluran, dan memerlukan banyak penyesuaian sistem superposisi agar sesuai dengan titik operasi keadaan awal.

Generator yang stabil merespon perubahan beban dengan berosilasi sementara hingga mencapai keadaan operasi baru yang stabil.

Sistem kontrol generator sangat berperan terhadap osilasi generator seperti AVR [7]. Solusi yang paling layak untuk memberikan redaman osilasi generator adalah peralatan tambahan berupa *power system stabilizer* (PSS). Namun, untuk mendapatkan redaman yang optimal, parameter PSS perlu ditala terlebih dahulu. Metode optimasi yang umum digunakan untuk mendapatkan nilai optimal seperti, algoritma genetic (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Random-Drift PSO (RD-PSO), Differential Evolution (DE), dan lain-lain. Metode optimasi yang bagus memiliki keseimbangan antara kemampuan eksplorasi dan eksploitasi, sehingga menjadi metode yang efisien [8]. Selain itu, pengaturan parameter kontrol metode optimasi sangat berpengaruh pada performa optimasi [9].

Maka dari itu dibutuhkan sebuah solusi guna mengatasi kekurangan metode ekuivalen saluran berbasis rugi-rugi saluran serta memanfaatkan metode optimasi yang efisien guna menemukan nilai optimal PSS. Oleh karena itu, pada Tugas Akhir ini diusulkan metode *power flow tracing* untuk menentukan kontribusi daya generator pada sebuah sistem kelistrikan dan metode optimasi modifikasi DE yang disebut *Hybrid Adaptive Chaotic-DE* (HACDE), metode optimasi yang terinspirasi dari persamaan *chaotic* serta memiliki kemampuan parameter kontrol yang adaptif untuk mendapatkan nilai PSS yang optimal.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan uraian latar belakang penelitian didapatkan beberapa permasalahan, antara lain:

1. Metode aliran daya superposisi guna mendapatkan impedansi ekuivalen berdasarkan rugi-rugi saluran memiliki banyak kelemahan.
2. Perlunya peningkatan performa metode optimasi konvensional untuk mendapatkan nilai konvergensi lebih baik dan cepat.
3. Generator PLTU Pacitan Sistem Transmisi 150kV Jawa Tengah memiliki permasalahan kestabilan dinamik yang perlu dianalisa.

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan penyusunan Tugas Akhir ini dimaksudkan untuk:

1. Mengadaptasi metode pendekatan *power flow tracing* untuk mengatasi kelemahan metode aliran daya superposisi guna mendapatkan impedansi ekuivalen berdasarkan rugi-rugi saluran.

2. Memodifikasi metode optimasi DE dengan mengadopsi persamaan *chaotic* dan parameter kontrol yang adaptif guna membentuk metode optimasi yang memiliki nilai konvergensi lebih baik dan cepat.
3. Mengatasi permasalahan kestabilan dinamik PLTU Pacitan Sistem Transmisi 150kV Jawa Tengah yang dimodelkan SMIB dengan impedansi ekuivalen hasil *power flow tracing* serta penambahan PSS yang ditala menggunakan HACDE.

1.4 Batasan Tugas Akhir

Untuk menyelesaikan permasalahan pada Tugas Akhir ini, maka ada beberapa asumsi dengan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Sistem transmisi diasumsikan model saluran transmisi pendek.
2. Perhitungan aliran daya menggunakan aliran daya newton raphson.
3. Perhitungan menggunakan bantuan MATLAB dan SIMULINK.
4. Metode optimasi modifikasi berdasarkan metode optimasi DE konvensional.
5. Model matematik dan linier generator menggunakan model Heffron-Phillips dan DeMello-Concordia.
6. Simulasi dilakukan secara *off-line* berdasarkan data dari PLN P2B 2015-2016.

1.5 Metodologi Tugas Akhir

Pada tugas akhir ini diusulkan model SMIB dengan impedansi ekuivalen hasil *power flow tracing* serta penambahan PSS yang ditala menggunakan HACDE untuk mengatasi permasalahan kestabilan dinamik pada generator PLTU Pacitan Sistem Transmisi 150kV Jawa Tengah. Untuk mendapatkan hasil akhir berupa impedansi ekuivalen dan nilai parameter PSS, terdapat beberapa tahapan untuk menyelesaikan tugas akhir ini adalah

1. Studi literatur
Literatur yang digunakan berasal dari *paper*, jurnal dan *text book*. Studi literatur bertujuan mengumpulkan teori – teori pendukung seperti pemodelan generator, *power flow tracing*, metode optimasi dan perancangan perangkat lunak menggunakan MATLAB.
2. Pengumpulan data
Data yang digunakan meliputi data pembangkitan, beban, saluran dan parameter generator. Data pembangkitan dan beban yang

digunakan untuk mendapatkan nilai daya aktif dan daya reaktif pada setiap cabang. Data saluran terdiri atas resistansi dan reaktansi saluran. Parameter generator digunakan untuk pemodelan guna mengamati respon dinamik generator. Semua data tersebut digunakan sebagai pendekatan data pengukuran sebenarnya yang akan disimulasikan dengan bantuan MATLAB.

3. Pemodelan sistem

Pemodelan sistem dimaksudkan agar hasil simulasi sedekat mungkin dengan kondisi sebenarnya. Pemodelan sistem terbagi menjadi 2 bagian, yaitu pemodelan aliran daya sistem dan pemodelan dinamik sistem generator.

4. Perancangan perangkat lunak

Perancangan perangkat lunak terbagi menjadi 3 bagian, yaitu perangkat lunak *power flow tracing*, metode optimasi, dan perangkat simulasi dinamik. Perancangan perangkat lunak berguna membentuk integrasi antara MATLAB dan SIMULINK.

5. Simulasi dan analisis

Simulasi digunakan guna mengamati hasil pendekatan *power flow tracing* dan respon dinamik generator dengan bantuan SIMULINK dengan nilai masukan dari hasil perhitungan aliran daya dan metode optimasi. Untuk menganalisa dan validasi dilakukan beberapa tes kasus baik pada pendekatan *power flow tracing* dan respon generator hasil penalaan beberapa metode optimasi.

6. Penulisan buku

Hasil Tugas Akhir yang telah dilakukan dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir dan publikasi *paper*. Laporan berisi penjabaran metode dan kesimpulan dari Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Laporan

Guna menguraikan penjelasan secara detail, tugas akhir ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut:

Bab 1: Pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, tujuan Tugas Akhir, permasalahan, batas masalah, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari Tugas Akhir.

Bab 2: Dasar teori yang menjelaskan teori pendukung berkaitan sistem transmisi, kestabilan dinamik, model SMIB, *Power Flow Tracing*, model linier generator dan *hybrid adaptive chaotic differential evolution* (HACDE).

- Bab 3: Perancangan sistem simulasi penalaan PSS menggunakan HACDE berdasarkan hasil reduksi jaringan rugi saluran menggunakan *power flow tracing*.
- Bab 4: Analisa performa hasil *power flow tracing* dan penalaan PSS menggunakan HACDE dibandingkan hasil metode lainnya.
- Bab 5: Kesimpulan tugas akhir yang mengemukakan hasil pembahasan dan saran-saran sehubungan dengan tugas akhir.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat berikut :

1. Sebagai metode alternatif ekuivalensi saluran untuk model SMIB.
2. Memberikan kontribusi kebaruan dalam bidang analisa sistem tenaga dengan pendekatan *power flow tracing*.
3. Sebagai alternatif metode superposisi guna mengatasi kelemahannya.
4. Memberikan kontribusi kebaruan terkait peningkatan performa metode optimasi.
5. Sebagai nilai referensi pengaturan PSS PLTU Pacitan guna meningkatkan redaman osilasi.
6. Menyederhanakan analisa kestabilan sistem multimesin dengan mengubah menjadi model SMIB.
7. Memberikan kontribusi terhadap perkembangan deregulasi sistem kelistrikan.
8. Menjadi referensi bagi penelitian lain yang memiliki topik berkaitan dengan Tugas Akhir ini.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

DASAR KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK, REDUKSI JARINGAN, DAN METODE OPTIMASI

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Sistem kelistrikan modern terhubung secara interkoneksi untuk memenuhi kebutuhan beban. Sistem kelistrikan interkoneksi tidak hanya menyediakan daya yang efisien dan ekonomis, tetapi juga meningkatkan kehandalan. Fluktuasi perubahan permintaan daya beban mampu menyebabkan osilasi pada sistem. Osilasi sistem diakibatkan oleh respon generator dalam menanggapi perubahan beban. Osilasi yang tidak teredam, menguat, atau tidak kembali pada kondisi operasi normal sistem disebut ketidakstabilan. Ketidakstabilan pada sistem tenaga mampu menyebabkan kehilangan sinkronisasi pada generator hingga menyebabkan pemadaman pada sistem, seperti yang terjadi pada Senin, 12 Mei 2014, PLTU Pacitan mengalami gangguan kestabilan hingga menyebabkan pemadaman listrik daerah Solo dan sekitarnya [1]. Oleh karena itu, perubahan beban dapat dipandang sebagai permasalahan kestabilan [2-3].

Berdasarkan sifat dan besar gangguan, kestabilan dalam sistem tenaga listrik terbagi menjadi tiga: kestabilan *stedy-state*, kestabilan transien, dan kestabilan dinamik [2].

2.1.1 Kestabilan *Steady State*

Kestabilan *steady-state* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi baru yang sama atau identik dengan kondisi sebelum terjadi gangguan setelah sistem mengalami gangguan kecil secara gradual. Kestabilan *steady state* biasanya berhubungan dengan kestabilan tegangan. Sehingga analisis yang umumnya digunakan adalah perhitungan aliran daya. Oleh karena itu, sistem dianggap mencapai kondisi baru dan dapat beroperasi tanpa megamati kondisi dinamiknya.

2.1.2 Kestabilan Transien

Kestabilan transien adalah kemampuan sistem tenaga untuk mencapai kondisi stabil operasi baru yang dapat diterima setelah sistem megalami gangguna besar sesaat. Analisis kestabilan transien

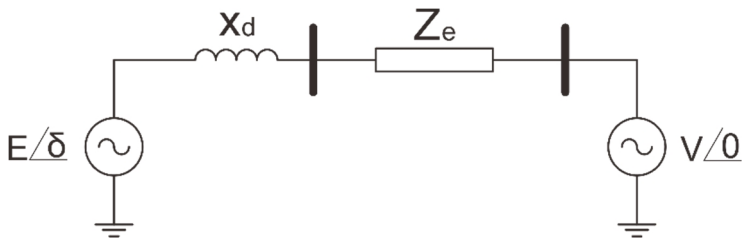
menggunakan pendekatan model nonlinear. Kestabilan transien pada sistem tenaga adalah respon output yang mencapai kondisi operasi *steady state* yang diizinkan dan sistem yang dapat kembali ke posisi operasi semula setelah sistem mengalami gangguan. Kestabilan transien merupakan fungsi dari kondisi operasi dan gangguan [7].

2.1.3 Kestabilan Dinamik

Kestabilan dinamik sistem tenaga listrik adalah analisis respon dinamik sistem tenaga listrik dengan mempertimbangkan peralatan kontrolnya akibat adanya gangguan yang sangat kecil, pada umumnya perubahan beban [7]. Kestabilan dinamik ini sama dengan kestabilan steady-state namun yang membedakan yaitu sistem eksitasi, turbin, dan generator dimodelkan dengan memperhitungkan variasi medan magnet pada air gap mesin, sedangkan pada kestabilan *steady state* generator direpresentasikan sebagai sumber tegangan yang konstan atau tidak terjadi variasi medan magnet. Sumber lain menyebutkan bahwa kestabilan ini berarti kemampuan sistem untuk tetap mempertahankan sinkronisasi setelah ayunan pertama atau periode transien hingga pada kondisi titik keseimbangan steady state [2].

2.2 Model Single Machine Infinite Bus (SMIB)

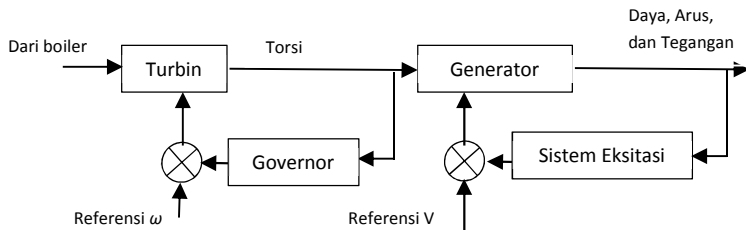
Walaupun sistem interkoneksi menyediakan daya yang efisien dan handal, kestabilan pada sistem interkoneksi tidak mudah dicapai karena interaksi antar generator dan peralatan kontrolnya. Hal ini menyebabkan sistem interkoneksi sulit untuk dianalisis. Pemilihan model analisis kestabilan dinamik dapat disesuaikan dengan kebutuhan analisis. Model linier *single machine infinite bus* (SMIB) dipilih untuk menyederhanakan analisis dan cukup merepresentasikan pengaturan peralatan kontrol generator [4]. Untuk mendekati respon osilasi generator akibat perubahan beban, generator perlu dimodelkan secara dinamik dengan mempertimbangkan sistem kontrolnya. Pada penelitian ini, model linier generator [10-11] dipilih untuk merepresentasikan model generator sinkron dengan tambahan beberapa komponen control seperti, governor dan AVR. Hal ini dikarenakan peralatan kontrol generator juga berkontribusi pada berosilasinya generator.



Gambar 2.1 Model *Single Machine Infinite Bus* (SMIB)

2.2.1 Model Linier Generator

Secara umum sistem pembangkit dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.2 [7]



Gambar 2.2 Sistem Pembangkit Listrik Secara Umum

Governor merupakan bagian dari unit pembangkit yang berfungsi untuk mengatur pemberian bahan bakar (uap atau air) pada sistem pembangkitan agar didapatkan kecepatan rotor yang stabil. Bila ada perubahan pada terminal keluaran generator akibat perubahan beban, maka akan terjadi fungsi *feedback* yang diatur oleh governor untuk menyesuaikan kembali putaran rotor.

Sistem eksitasi adalah sistem pengendali keluaran generator, seperti tegangan, arus dan faktor daya. Bila ada perubahan pada keluaran generator tersebut, maka sistem eksitasi lah yang berfungsi untuk mengendalikan generator agar menyesuaikan dan mencari titik keseimbangan baru.

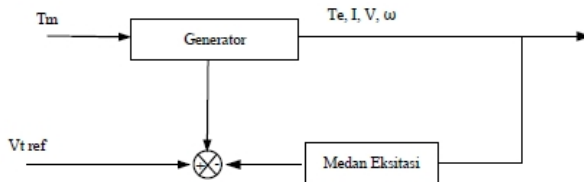
Kedua peralatan sistem kontrol (governor dan sistem eksitasi) mempunyai perbedaan waktu respon. Governor mempunyai respon yang lambat terhadap perubahan beban, sedangkan sistem eksitasi responnya lebih cepat. Namun, karena governor mempunyai waktu respon yang

lebih lambat, maka dalam studi kestabilan dinamik, yang diperhatikan adalah sistem eksitasi.

Seperti telah dijelaskan, bahwa dengan adanya perubahan beban atau gangguan kecil, akan berimbas terhadap perubahan kecepatan rotor. Perubahan kecepatan rotor ini secara langsung akan berakibat terhadap perubahan kecepatan sudut rotor sehingga berimbas pada keluaran generator. Jika kecepatan sudut rotor akan berosilasi di sekitar nilai sinkronnya, maka tegangan keluarannya akan berosilasi di sekitar harga nominalnya.

Maka dapat diambil kesimpulan bahwa kestabilan dinamik didapat dari adanya perubahan beban kecil atau gangguan yang mengakibatkan perubahan kecepatan sudut rotor dan tegangan keluaran namun sistem pembangkitannya yaitu governor dan sistem eksitasi mampu menyesuaikannya dan menemukan titik keseimbangan baru [3].

Dinamika dasar dari sebuah mesin sinkron diperlihatkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Dinamika Dasar Generator Sinkron

Suatu generator agar menghasilkan energi listrik, membutuhkan dua masukan, yang pertama torsi mekanik turbin (T_m) dan yang kedua fluksi medan magnet (EFD). Torsi mekanik berfungsi sebagai pemutar generator sinkron. Fluksi medan magnet dihasilkan dari rangkaian medan melalui lilitan yang terdapat pada rotor. Dengan adanya torsi mekanik, rotor generator berputar dengan energi kinetik $\frac{1}{2} J \omega^2$ Joule. Momentum sudut

$$M = J \omega \quad (2.1)$$

Dengan ω (radian per detik) merupakan kecepatan sudut dan J adalah momen inersia (kg.m^2). Fluksi yang dibangkitkan oleh kumparan medan rotor dengan arus I_f akan berputar dan menginduksikan gaya gerak listrik pada kumparan stator sebesar

$$E = c n \phi \quad (2.2)$$

Jika generator sinkron dibebani, maka akan mengalir arus generator ke beban. Arus ini menghasilkan fluksi pada stator dan akan menimbulkan torsi elektrik (T_e) melawan torsi mekanik. Pada kondisi tunak, jumlah torsi mekanik dengan torsi elektrik sama dengan nol ($T_m - T_e = 0$), dan generator akan berputar pada kecepatan sudut sinkron (ω_0). Sebelum mencapai kondisi tunak ada masa transien dan jumlah torsi ini menimbulkan torsi akselerasi dan akan menghasilkan percepatan atau perlambatan, persamaan gerak pada kondisi ini adalah:

$$Ta = J \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.3)$$

Dengan

T_m = Torka mekanik turbin (N.m)

T_e = Torka elektrik rotor (N.m)

T_a = Percepatan torka (N.m)

T = waktu (detik)

δ = sudut mekanis rotor (rad-mekanik)

J = total momen inersia mesin sinkron (kg.m²)

Persamaan (2.3) dikali dengan kecepatan sudut (ω_m), sehingga didapat persamaan:

$$\omega_m J \frac{d^2\delta}{dt^2} = Pa = P_m - P_e \quad (2.4)$$

Dengan

P_m = Daya mekanik pada rotor (Watt)

P_e = daya elektrik pada rotor (Watt)

Pa = daya percepatan (Watt)

ω_m = Kecepatan sudut sinkron (rad mekanik/s)

Persamaan diatas dapat diubah menjadi

$$\frac{2}{\omega_m} \left(\frac{1}{2} \omega_m^2 J \right) \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.5)$$

Jika persamaan (2.5) dibagi dengan rating MVA generator (S), maka:

$$\frac{2}{\omega_m S} \left(\frac{1}{2} \omega_m^2 J \right) \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.6)$$

Jika

$$H = \frac{E}{k} \frac{p}{R} \frac{k}{M} \frac{S_i}{H} = \left(\frac{1}{2} \omega_m^2 J \right) / S \quad (2.7)$$

Maka persamaan (2.6) dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{2H}{\omega_m} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e(p.u) \quad (2.8)$$

Dengan

$$\omega_m = \frac{2}{P} \omega_s \quad (2.9)$$

$$\delta_m = \frac{2}{P} \delta \quad (2.10)$$

ω_s = kecepatan sudut sinkron (rad/s)

δ = sudut beban / elektrik rotor (rad)

p = jumlah kutub generator

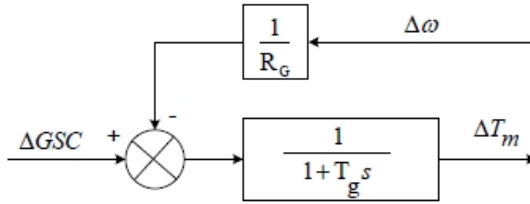
Persamaan (2.8) disebut dengan persamaan ayunan mesin yang merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) perputaran mesin sinkron dalam studi kestabilan. Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa perbedaan antara daya mekanik turbin dan daya elektrik generator menyebabkan sudut rotor mengalami percepatan atau perlambatan. Oleh karena mesin memiliki komponen torsi yang sebanding dengan kecepatan sudut, maka persamaan gerak rotor secara lengkap dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} = T_m - T_e \quad (2.11)$$

Dimana D merupakan koefisien redaman mesin. Suatu generator yang beroperasi pada kondisi tunak ($T_m = T_e$), kemudian terjadi penambahan beban kecil yang menyebabkan kenaikan fluksi medan stator dan perubahan $E'q$. Perubahan kecil juga menyebabkan perubahan sudut mesin dan perubahan torsi elektrik, torsi elektrik akan naik dengan bertambahnya sudut mesin δ , dan $E'q$.

2.2.1.1 Pemodelan Governor

Governor merupakan pengendali yang berfungsi untuk mengatur nilai torsi mekanik yang menjadi masukan generator. Besar perubahan torsi mekanik T_m tergantung pada konstanta *speed droop*, *transfer function* governor dan sumber energi. Perubahan nilai T_m dihasilkan oleh perubahan kecepatan ω , perubahan beban dan *speed reference* (*Governor Speed Changer*, GSC). Jika terjadi perubahan putaran rotor generator, maka governor akan memberi umpan balik untuk mencapai keseimbangan baru. Representasi governor ditunjukkan pada Gambar 2.4. Berdasarkan Gambar 2.4, perubahan kecepatan rotor generator $\Delta\omega$ atau ΔGSC dapat menghasilkan sebuah perubahan torsi mekanik mesin ΔT_m .



Gambar 2.4 Diagram Blok Governor

Dalam model ini, diasumsikan ΔGSC adalah menggunakan sinyal unit step dan efek penggabungan sistem turbin dengan *speed governor* menghasilkan daya mekanik P_m yang dirumuskan sebagai berikut.

$$P_m = -[K_g / (1 + T_g s)] \Delta \omega \quad (2.12)$$

Dengan,

K_g : Konstanta gain = $1/R_g$

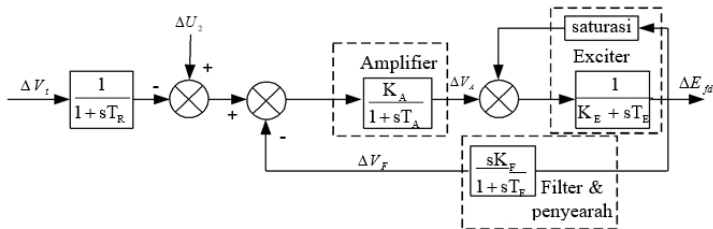
T_g : Governor time constant

R_g : Konstanta droop governor

ΔGSC : Perubahan acuan kecepatan (*Governor Speed Changer*)

2.2.1.2 Pemodelan Sistem Eksitasi

Model sistem eksitasi dalam pengaturan tegangan mengacu pada model IEEE tipe 1 [12] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Diagram Blok Sistem Eksitasi

Parameter sistem ekstasi di atas dapat dijelaskan sebagai berikut.

K_A : konstanta penguatan amplifier

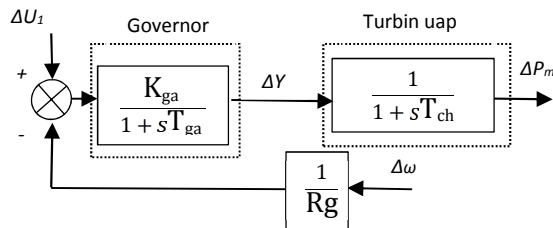
K_F : konstanta penguatan filter

K_E : konstanta penguatan *exciter*
 T_A : waktu tanggap amplifier
 T_E : waktu tanggap *exciter*
 T_F : waktu tanggap filter
 ΔU_2 : perubahan sinyal kontrol mesin

Harga konstanta T_R biasanya kecil sekali, sehingga dapat diabaikan. Dengan ΔV_A = perubahan tegangan amplifier dan ΔV_F = perubahan tegangan keluaran penyearah.

2.2.1.3 Pemodelan turbin *no reheat* dan Sistem Pengendaliannya

Model turbin dan sistem pengendaliannya yang dipakai disini adalah model turbin uap dan pengendaliannya, mengacu pada model standar IEEE [12]. Turbin uap memiliki input berupa energi mekanik yang disemburkan dari ketel uap dan memiliki output energi (torka) mekanik yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Model turbin uap dalam bentuk linier dapat dilihat pada Gambar 2.6



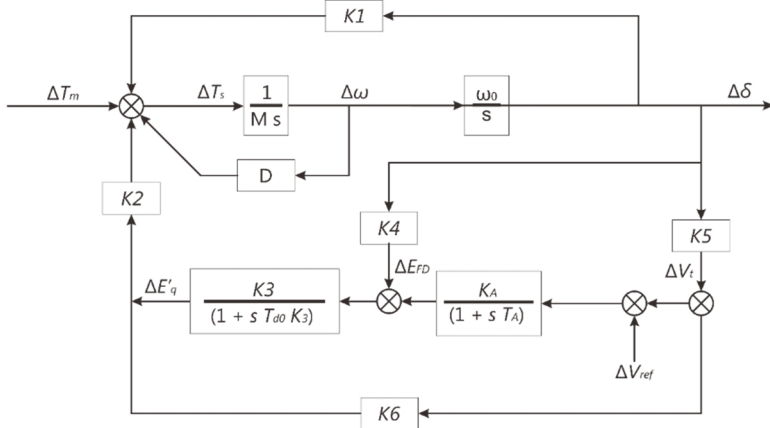
Gambar 2.6 Diagram Blok Turbin Uap dan Sistem Pengendalinya

Parameter turbin uap diatas dapat dijelaskan sebagai berikut:

ΔY : perubahan tinggi katup
 T_w : waktu tanggap turbin uap
 T_{ga} : waktu tanggap pengatur turbin uap
 T_{ch} : konstanta waktu turbin uap (s)
 K_{ga} : penguatan pengatur turbin uap
 R_g : konstanta pengatur turbin uap
 ΔU_1 : perubahan sinyal kontrol umpan balik
 ΔP_m : perubahan daya mekanik

2.2.1.4 Model Linier Generator Lengkap

Dari perumusan blok diagram yang dijabarkan diatas, maka dapat dibentuk model linier mekanik, elektrik, governor, dan sistem eksitasi generator secara utuh. Blok diagram permodelan Turbin, governor, dan sistem eksitasi disesuaikan dengan penjabaran yang telah dijelaskan sebelumnya. Gambar 2.7 menunjukkan permodelan linier dari generator beserta peralatan kontrolnya secara utuh.



Gambar 2.7 Permodelan Linier Generator [10-11]

2.3 Pemodelan Power System Stabilizer

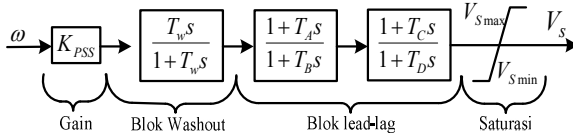
PSS banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk memperbaiki kestabilan dinamik, PSS digunakan sebagai kontroler sistem eksitasi untuk menambah redaman pada osilasi rotor. Untuk menghasilkan komponen redaman PSS memproduksi komponen torsi elektrik yang sesuai dengan deviasi pada kecepatan rotor. PSS harus ditala dengan tepat, untuk membantu *exciter* dalam meredam osilasi.

PSS menerima input berupa perubahan kecepatan rotor untuk menghasilkan sinyal tambahan sebagai kontroler *exciter*. *Exciter* mempengaruhi besar tegangan medan yang dihasilkan pada sisi rotor dan mempengaruhi besar fluks magnetik yang dibangkitkan. Fluks magnetik berbanding lurus dengan besar torka elektrik yang dihasilkan pada mesin. Torka elektrik melawan besar torka mekanik untuk meredam osilasi frekuensi yang terjadi pada mesin [2].

Agar dapat berfungsi dengan baik, PSS harus ditala dengan tepat. Metode desain PSS secara umum melibatkan frekuensi respon yang berdasarkan pada konsep peningkatan redaman torsi. Transfer function PSS ditala untuk menyediakan karakteristik *phase-lead* yang tepat untuk mengkompensasi *phase-lag* antara frekuensi input automatic voltage regulator Δv_s dan torsi elektrik [2]. Sehingga, komponen torsi elektrik sefasa dengan variasi kecepatan untuk memperbaiki redaman. Dengan menggunakan model matematika PSS yang sederhana, sehingga model matematika PSS dapat ditulis

$$V_s = K_{pss} \frac{T_w s}{1 + T_w s} \left[\frac{(1 + sT_A)(1 + sT_C)}{(1 + sT_B)(1 + sT_D)} \right] \omega \quad (2.13)$$

Dengan mengasumsikan bahwa output dari PSS adalah V_s dengan input $\Delta\omega$, maka Persamaan 2.13 dapat ditulis dalam diagram blok pada Gambar 2.7.



Gambar 2.8 Blok Diagram PSS

Blok diagram PSS pada Gambar 2.7 terdiri dari satu blok *gain*, satu blok *washout*, 2 blok *lead-lag*, dan *limiter*. Fungsi dari masing-masing blok adalah sebagai berikut:

- Blok Gain**
Gain berfungsi untuk mengatur besar penguatan agar diperoleh besaran torsi sesuai dengan yang diinginkan. Sinyal input PSS dapat diambil dari berbagai macam sinyal seperti perubahan rotor, keluaran daya elektrik atau frekuensi terminal bus.
- Blok Washout Filter**
Wash out filter berfungsi untuk menyediakan bias *steady state* output PSS yang akan memodifikasi tegangan terminal generator. PSS diharapkan hanya dapat merespon variasi *transient* dari sinyal

kecepatan rotor generator dan tidak untuk sinyal DC offset. *Wash out filter* bekerja sebagai *high pass filter* yang akan melewatkan semua frekuensi yang diinginkan. Apabila hanya mode lokal yang diinginkan, nilai T_w dapat dipilih dalam range 1 sampai 2. Tetapi, jika mode interarea juga ingin diredam, maka nilai T_w harus dipilih dalam interval 10 sampai 20. Nilai T_w yang lebih tinggi dapat memperbaiki respon tegangan sistem selama *island operation*.

c. Blok *Lead-Lag*

Lead-Lag berfungsi sebagai penghasil karakteristik *phase-lead* yang sesuai untuk mengkompensasi *phase-lag* antara masukan eksitasi dan torsi generator.

d. *Limiter*

Output PSS dibatasi agar aksi PSS pada AVR sesuai dengan yang diharapkan. Sebagai contoh, pada saat terjadi pelepasan beban, AVR beraksi untuk mengurangi tegangan terminal generator pada saat PSS menghasilkan sinyal kontrol untuk menaikkan tegangan (karena kecepatan rotor generator bertambah besar pada saat terjadi pelepasan beban). Pada kondisi ini sangat diperlukan untuk menonaktifkan PSS. Hal ini menunjukkan pentingnya pembatasan nilai sinyal output PSS yang dapat dilakukan oleh blok *limiter*. Perlu diperhatikan bahwa, nilai Batasan negatif yang tinggi dapat mengganggu kestabilan swing yang pertama.

2.4 Reduksi Jaringan Berdasarkan Konsep Kerugian Saluran

Pada umumnya transmisi pada sistem tenaga didesain terhubung secara interkoneksi, yang memungkinkan banyak mesin (multimesin) menyuplai permintaan beban secara bersama-sama. Pemilihan model analisis kestabilan dinamik dapat disesuaikan dengan kebutuhan analisis. Untuk mengubah sistem multimesin menjadi model SMIB, diperlukan mengetahui impedansi ekuivalen generator yang diamati. Beberapa metode yang digunakan untuk ekuivalensi saluran adalah ekuivalen ward [13] dan rei-dimo [14]. Metode ekuivalen ward memodelkan eksternal sistem yang tidak diamati sebagai komponen statik. Pada metode ekuivalen ward beban dimodelkan sebagai impedansi paralel dan generator sebagai injeksi daya. Solusi yang ditawarkan untuk merepresentasikan respon daya reaktif adalah extended ward ekuivalen [15]. Namun, ekuivalen ward tidak merepresentasikan kondisi fisik sistem [16]. Alternatif lain metode ekuivalensi adalah rei-dimo, metode

ini memiliki pendekatan secara fisik berbasis analisis node, tetapi pada umumnya rei-dimo digunakan untuk pengujian kestabilan *steady-state* [17-18]. Namun, metode rei-dimo mempertahankan sistem yang diamati tetap multimesin, sehingga tidak fokus mengamati satu mesin yang mengalami gangguan. Alternative lain metode ekuivalensi saluran yang tergolong baru adalah metode berbasis konsep rugi-rugi saluran [5]. Metode ini mengubah sistem *multimachine* menjadi *single-machine* sehingga fokus mengamati mesin yang mengalami gangguan. Namun, pada metode ekuivalensi saluran berbasis rugi-rugi memiliki kekurangan yaitu sistem dimodelkan superposisi tidak merepresentasikan keadaan semula saat multimesin, beban dinormalisasi secara seragam, terkadang hasil aliran daya superposisi tidak konvergen akibat terlalu besarnya impedansi saluran, dan memerlukan banyak penyesuaian agar sesuai dengan titik operasi keadaan awal. Oleh Karena itu pada penelitian ini diusulkan sebuah solusi untuk mengatasi permasalahan-permasalahan pada metode ekuivalensi berbasis rugi-rugi saluran dengan mengubah pendekatan superposisi menjadi *power flow tracing*.

2.5 Power Flow Tracing

Metode *power flow tracing* banyak digunakan untuk metode deregulasi sistem kelistrikan interkoneksi akibat persaingan pasar energi [19-23]. Tujuan utama metode *power flow tracing* adalah untuk transparansi penggunaan saluran transmisi yang terbuka untuk pasar transfer energi, sehingga biaya perawatan saluran transmisi lebih adil [23]. Keuntungan metode *power flow tracing* adalah mempertahankan sistem yang diamati berjalan pada multimesin, tidak memerlukan normalisasi beban, terjaminnya konvergensi aliran daya, dan merepresentasikan titik operasi mesin sebelum gangguan. Pendekatan yang dilakukan pada [19] mengubah saluran transmisi diasumsikan menjadi saluran *loseless* terlebih dahulu kemudian dilakukan proses *tracing*. Proses *tracing* yang melibatkan invers matriks mengonsumsi waktu kalkulasi untuk sistem kelistrikan yang besar dan asumsi yang digunakan tidak merepresentasikan ketidaklinieran sistem kelistrikan. Pada [20] memperkenalkan metode baru yang disebut domain, commons, link dan state graph serta cocok untuk sistem skala besar. Namun, tidak ada penjelasan dan pembuktian kondisi yang dibutuhkan untuk metode ini. Pada [21] diperkenalkan metode *power flow tracing* menggunakan pendekatan *graph theory* tanpa mempertimbangkan *loopflow*, kemudian pada [22] dikembangkan metode yang mempertimbangkan *loop-flow*.

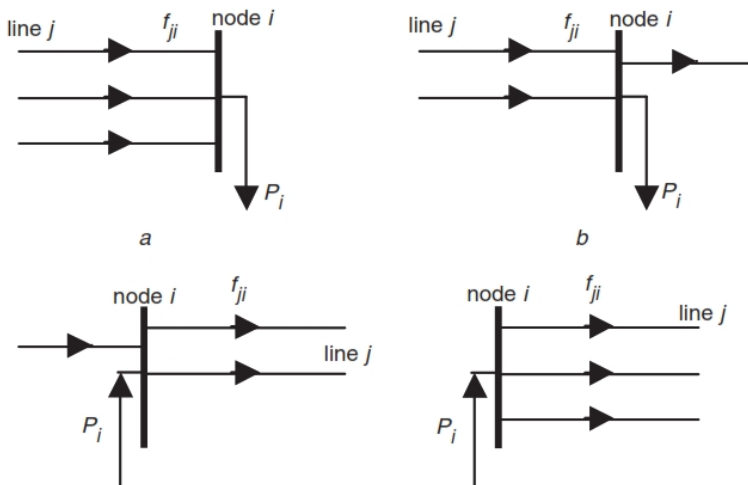
Kedua metode tersebut menggunakan asumsi yang sama seperti pada [19] dan membutuhkan penentuan urutan *tracing* pertamanya sehingga proses *tracing* tergantung pada urutan busnya. Lebih jauh lagi, metode ini tidak dijelaskan menangani ketika terdapat lebih dari satu node sink atau source. Pada [23] diusulkan metode *power flow tracing* yang efisien berbasis matriks hasil aliran daya atau data *state estimation*. Metode ini tanpa melibatkan proses invers matriks dan tanpa pencarian *tracing* yang rumit. Hasil *power flow tracing* dapat menampilkan seperti:

1. Kontribusi daya yang disuplai oleh setiap generator ke masing-masing bus sistem.
2. Kontribusi daya yang diserap oleh setiap bus beban dari masing-masing bus sistem.
3. Kerugian saluran diakibatkan oleh aliran daya yang diserap oleh beban.
4. Kerugian saluran diakibatkan oleh aliran daya yang disuplai oleh generator.

Sehingga kita dapat mengetahui beban/generator yang menyebabkan/menanggung kerugian saluran yang besar.

2.5.1 Jenis-Jenis Node pada Power Flow Tracing [23]

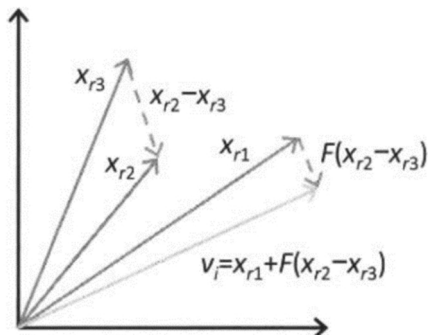
Untuk tujuan *power flow tracing*, *node* sistem diklasifikasikan menjadi empat tipe *node* yang berbeda. *Sink node* merupakan *node* yang menerima daya dari semua *node* yang bersebelahan. Pada suatu sistem kelistrikan yang berjalan dengan tepat, pasti terdapat satu *sink node*. Semua daya yang mengalir melalui saluran yang terhubung dengan *sink node*, memiliki jumlah yang sama dengan beban pada *node* tersebut, seperti gambar 2.9a. *Load node* merupakan *node* yang menerima daya dari beberapa *node* sebelahannya, sementara juga mengirimkan daya ke beberapa *node* sebelahannya. *Net power injection* pada *node* ini bernilai negatif, tampak pada gambar 2.9b. Aliran daya yang masuk pada *node* ini terbagi antara daya yang diserap beban dan daya yang dialirkan keluar melalui saluran lainnya. *Generation node* merupakan *node* yang memiliki *net injected power* bernilai positif. *Node* ini tidak mengambil daya sama sekali. Jenis *node* yang terakhir adalah *source node*, merupakan *node* yang semua salurannya menyuplai daya ke *node* sebelahannya. *Node* ini berkebalikan dengan *sink node*.



Gambar 2.9 Jenis-jenis *node* pada *power flow tracing*

2.6 Metode Optimasi *Differential Evolution* (DE)

Differential evolution (DE) yang dikembangkan oleh Rainer Storn and Kenneth V. Price sekitar 1995. DE adalah algoritma evolusi yang unik karena tidak terinspirasi dari proses biologis layaknya algoritma evolusi yang mengadopsi proses evolusi [24]. DE merupakan algoritma *population-based* yang didesain untuk optimasi fungsi dengan n-dimensi pada domain kontinu.



Gambar 2.10 Ilustrasi dasar optimasi 2 dimensi ($n=2$) [24]

Gambar 2.9 menggambarkan metode DE dalam permasalahan 2 dimensi. 2 individu, x_{r2} dan x_{r3} , dipilih secara acak dengan syarat $r_2 \neq r_3$. Proses optimasi DE didapatkan dengan mengambil perbedaan antara 2 vektor antara 2 individu, dan ditambahkan ke individu ketiga yang dipilih secara acak juga, x_{r1} ($r_1 \neq r_2 \neq r_3$), dengan sebelumnya perbedaan antara 2 vektor tersebut diskalakan, untuk membuat kandidat solusi yang baru. Hasil ini disebut vektor mutan yang mungkin bisa menjadi kandidat solusi baru pada populasi.

Setelah mutan vektor (v_i) terbentuk, akan digunakan untuk membentuk vektor kombinasi antara vektor mutan dengan vektor individu awal (x_i), yang biasa disebut pindah silang (*crossover*). Dimana $i \neq r_1 \neq r_2 \neq r_3$, untuk membentuk vektor trial (u_i). Proses pindah silang didapatkan dengan cara:

$$u_{ij} \begin{cases} v_{ij} & \text{jika } r_{cj} < C \text{ atau } j = Jr \\ x_{ij} & \text{selain itu} \end{cases}$$

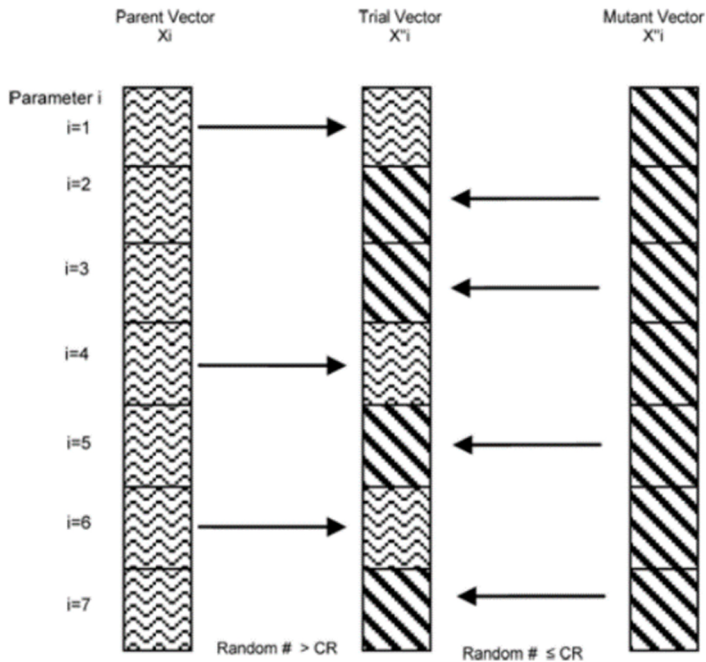
untuk $j \in [1, n]$, dimana n adalah dimensi permasalahan dan juga dimensi dari vektor mutan (v_i), vektor trial (u_i) dan vektor individu awal (x_i). r_{cj} adalah nilai acak yang diambil dari distribusi uniform $[0, 1]$. C adalah konstanta pindah silang $[0, 1]$. Kemudian Jr adalah nilai acak bulat dengan nilai $[1, n]$. Sehingga dapat kita lihat bahwa vektor trial merupakan kombinasi komponen per komponen antara vektor individu (x_i) dengan vektor mutan (v_i). Nilai pindah silang (c) mengendalikan seberapa mirip setiap komponen vektor trial berasal dari vektor mutan (v_i).

Setelah N vektor trial terbentuk, dimana N adalah ukuran populasi, yang akan dibandingkan tiap individunya antara trial vektor (u_i) dengan vektor individu awal (x_i). vektor yang paling sesuai dengan permasalahan kita, kasus memaksimalkan atau meminimalkan. Sehingga vektor (individu/trial) yang paling cocok akan dipertahankan untuk generasi selanjutnya, dan yang paling tidak sesuai ditinggalkan.

Pada DE terdapat 3 parameter kontrol yang dapat disesuaikan untuk meningkatkan kecepatan konvergensi, menghindari *local optima*, dan meningkatkan mencapai nilai global optimum, yaitu:

1. Jumlah populasi (Npop)
2. Faktor skala (F)
3. Faktor pindah silang (C)

Parameter-parameter di atas tergantung dari permasalahan yang akan kita selesaikan, tetapi secara umum (tetapi tidak selalu) jangkauan yang dipilih $F \in [0.4, 0.9]$ dan $c \in [0.1, 1]$.



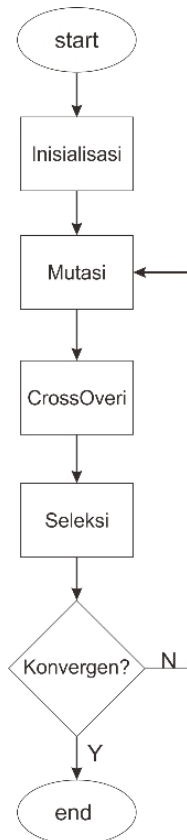
Gambar 2.11 Proses pindah silang [25]

2.6.1 Algoritma Differential Evolution

Algoritma di atas merupakan DE klasik atau juga disebut DE/rand/1/bin karena vektor dasar sebagai pembentuk vektor mutan dipilih secara acak, x_{r1} . Kemudian menggunakan 1 vektor perbedaan ($F(x_{r2} - x_{r3})$) yang dijumlahkan kepada vektor x_{r1} . Jumlah vektor mutan yang berkontribusi menjadi vektor trial mendekati distribusi binomial.

$F = \text{faktor skala} \in [0.4, 0.9]$
 $c = \text{pindah silang} \in [0.1, 1]$
 Inisialisasi populasi awal kandidat solusi $\{x_i\}$ untuk $i \in [1, N]$
While not (kriteria stop)
 Untuk setiap individu x_i , $i \in [1, N]$
 $r_1 \leftarrow \text{bilangan bulat acak} \in [1, N] : r_1 \neq i$
 $r_2 \leftarrow \text{bilangan bulat acak} \in [1, N] : r_2 \neq i \neq r_1$
 $r_3 \leftarrow \text{bilangan bulat acak} \in [1, N] : r_3 \neq i \neq r_1 \neq r_2$
 r_2
 $v_i \leftarrow x_{r1} + F(x_{r2} - x_{r3})$ (**vektor mutan**)
 $Jr \leftarrow \text{bilangan bulat acak} \in [1, n]$
 Untuk setiap dimensi $j \in [1, n]$
 $rcj \leftarrow \text{bilangan acak} \in [0, 1]$
 if ($rcj < c$) or ($j=Jr$) **then**
 $u_{ij} \leftarrow v_{ij}$
 else
 $u_{ij} \leftarrow x_{ij}$
 end if
 dimensi berikutnya
 individu berikutnya
 untuk setiap indeks populasi (**vektor individu dan trial**)
 if $f(u_i) < f(x_i)$ **then** $x_i \leftarrow u_i$
 indeks populasi berikutnya
 generasi berikutnya

Gambar 2.12 Algoritma *differential evolution* [24]



Gambar 2.13 Diagram alir *differential evolution*

2.7 Penalaan Optimal Parameter PSS dengan Metode Optimasi

Generator yang stabil merespon perubahan beban dengan berosilasi sementara hingga mencapai keadaan operasi baru yang stabil. Sistem kontrol generator sangat berperan terhadap osilasi generator seperti AVR [7]. Solusi yang paling layak untuk memberikan redaman osilasi generator adalah peralatan tambahan berupa *power system stabilizer* (PSS). Namun, untuk mendapatkan redaman yang optimal, parameter PSS perlu ditala terlebih dahulu. Metode optimasi yang umum digunakan untuk mendapatkan nilai optimal seperti, algoritma genetik

(GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Random-Drift* PSO (RD-PSO), *Differential Evolution* (DE), dan lain-lain. Pada tugas akhir ini, diusulkan metode modifikasi DE yang disebut *Hybrid Adaptive Chaotic-DE* (HACDE). Terinspirasi dari persamaan *chaotic* yang mampu mencakup daerah yang pencarian yang luas. Lebih jauh lagi, pengaturan parameter kontrol DE (iterasi, populasi, mutasi, dan pindah silang) sangat berpengaruh pada performa optimasi, sehingga ditambahkan mekanisme parameter adaptif yang dimaksudkan untuk efisiensi DE [26]. Mengadopsi persamaan chaotic ditambah parameter kontrol yang adaptif ke dalam metode optimasi DE, mampu memperoleh nilai optimal yang lebih baik dibandingkan metode DE dan PSO.

Untuk mendapatkan nilai redaman optimal dan cepat, fungsi objektif berbasis eigenvalue digunakan untuk menala parameter PSS. Selain menggunakan eigenvalue, untuk menunjukkan kelebihan performa HACDE, respon generator juga disimulasikan pada domain waktu. Parameter evaluasi secara domain waktu menggunakan *integral time absolute error* (ITAE) juga menunjukkan bahwa HACDE memiliki performa yang lebih baik dibandingkan DE dan PSO.

2.8 Persamaan *Chaotic*

Chaos adalah fenomena nonlinier di alam yang memiliki karakter *ergodicity*, acak, dan sensitif terhadap nilai awalnya [27]. Fungsi *chaotic* iteratif pada penelitian ini menggunakan fungsi *chaotic logistic* dengan $\mu = 4$:

$$\begin{aligned} c_{.j}^{k+1} &= \mu \cdot c_{.j}^k \cdot (1 - c_{.j}^k) \\ k &= 1, 2, \dots \\ c_{.j} &\in (0,1), \\ c_{.j} &\neq 0.25, 0.5, 0.75, d \quad 1 \end{aligned} \tag{2.14}$$

Fungsi *chaotic* iteratif memiliki probabilitas yang tinggi pada daerah-daerah batas, sehingga bisa digunakan sebagai operator operasi pada metode optimasi untuk menghindari konvergensi yang terlalu awal [28].

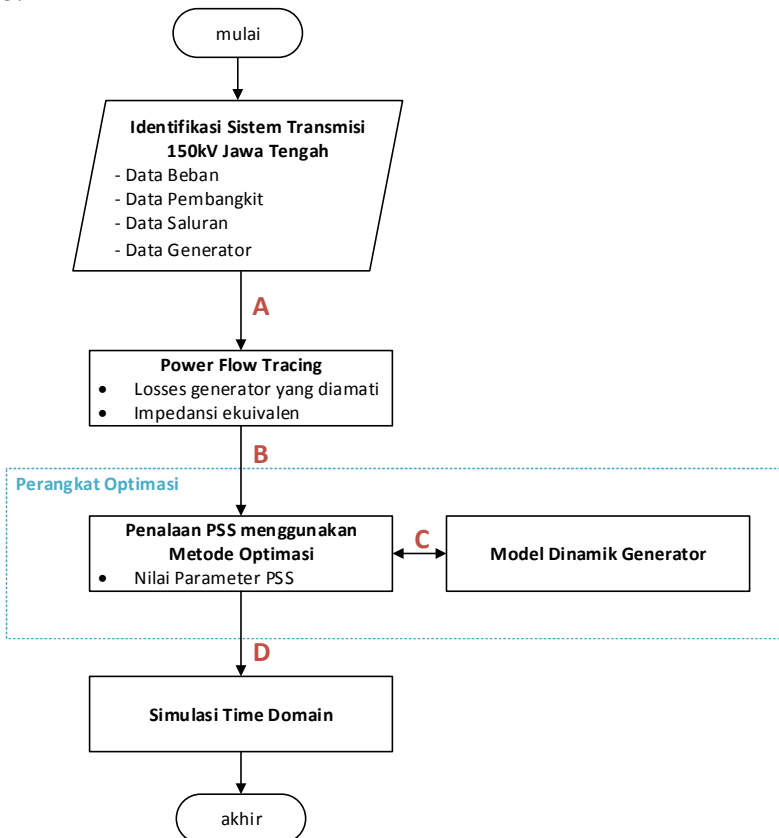
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

PEMODELAN OPTIMASI PENALAAN PARAMETER PSS MENGGUNAKAN HACDE DAN REDUKSI JARINGAN BERDASARKAN RUGI SALURAN

3.1 Diagram Alir Utama

Pemodelan perangkat simulasi dilakukan untuk mengetahui parameter-parameter yang digunakan dalam proses optimasi, Pemodelan perangkat simulasi secara umum dapat dilihat pada diagram alir Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram alir utama

Diagram alir di atas menampilkan kerangka penyelesaian tugas akhir terhadap permasalahan optimasi parameter PSS dan reduksi jaringan. Secara umum, pemodelan ini dibagi menjadi 3 komponen utama, yaitu:

1. Pemodelan *power flow tracing* pada MATLAB: bertujuan mencari kerugian saluran yang diakibatkan oleh sebuah generator. Kemudian berdasarkan kontribusi kerugian saluran didapatkan impedansi ekuivalen sebuah generator yang diamati.
2. Pemodelan dinamik generator pada SIMULINK: guna didapatkan parameter yang diperlukan untuk simulasi.
3. Pemodelan metode optimasi HACDE pada MATLAB: untuk menala parameter PSS berdasarkan model dinamik generator di SIMULINK agar memberikan redaman optimal.

Data awal yang digunakan sebagai masukan berupa data aliran daya dan parameter generator.

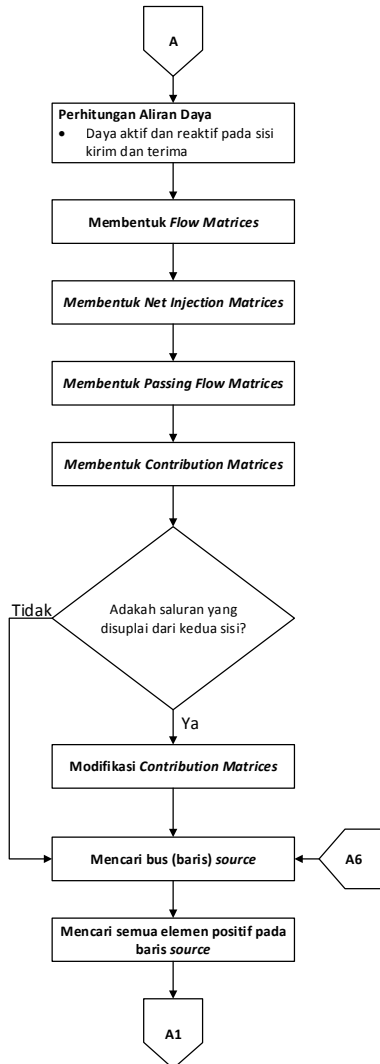
3.2 Sistem Transmisi 150kV Jawa Tengah

Sistem kelistrikan transmisi terdapat beberapa tingkat tegangan, seperti 500kV, 150kV, dan 70kV. Sistem transmisi Jawa Tengah secara lengkap ditampilkan pada lampiran 1. Pada tugas akhir ini memfokuskan pengamatan pada generator pacitan yang terhubung pada sistem transmisi 150kV. Sehingga pada tugas akhir ini dipilih hanya mempertimbangkan sistem yang terhubung pada tegangan 150kV. Untuk mengamati kondisi sistem kelistrikan Jawa Tengah digunakan bantuan program aliran daya berdasarkan buku Analisis Sistem Tenaga karangan Hadi Saadat. Oleh karena itu, sistem kelistrikan Jawa Tengah disederhanakan agar aliran daya mampu dihitung menggunakan program aliran daya Hadi Saadat. Sehingga sistem kelistrikan Jawa Tengah 150kV terdiri dari:

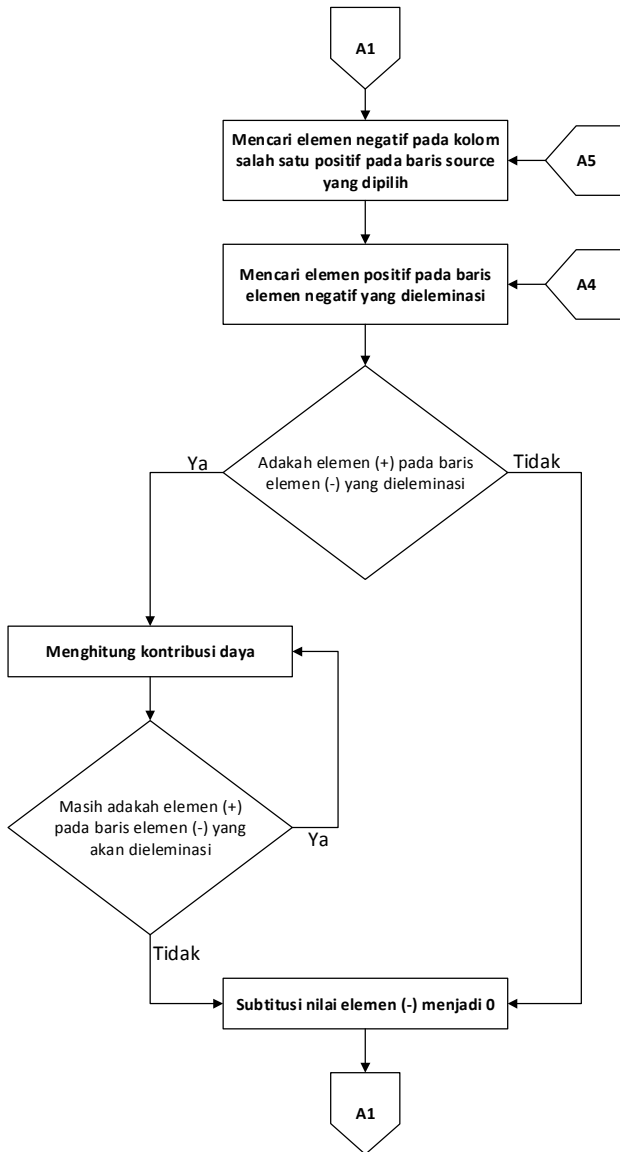
- 12 pembangkit
- 77 gardu induk
- 103 saluran transmisi.

Data aliran daya berupa data beban, data pembangkit, dan data saluran ditunjukkan pada lampiran 1.

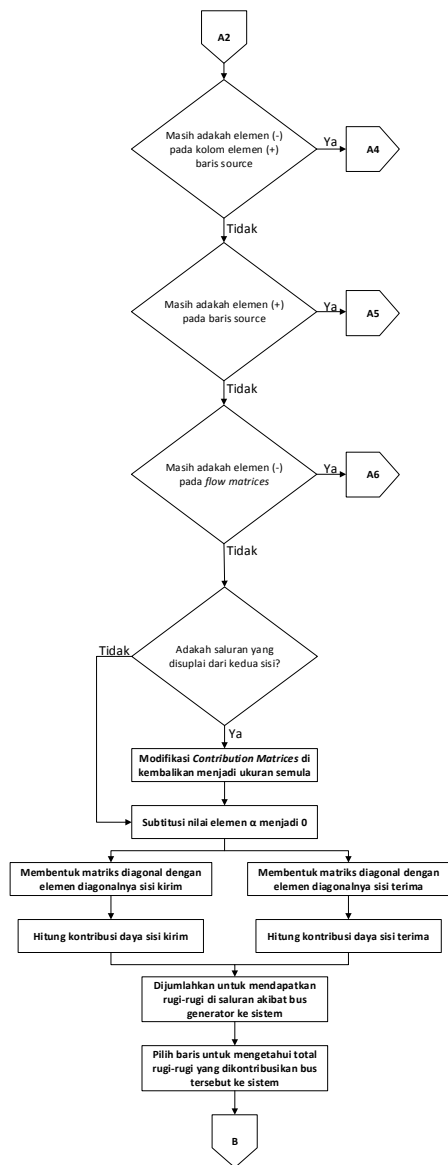
3.3 Diagram Alir *Power Flow Tracing*



Gambar 3.2 Diagram alir *power flow tracing*



Gambar 3.3 Diagram alir *power flow tracing* lanjutan



Gambar 3.4 Diagram alir *power flow tracing* lanjutan

Pada tugas akhir ini diusulkan metode *power flow tracing* untuk mengatasi kekurangan metode superposisi pada penelitian sebelumnya. *Power flow tracing* berguna mengetahui kontribusi daya baik dari pembangkit/beban pada setiap bus pada sisi terima/kirim. Namun, pada tugas akhir ini, *power flow tracing* hanya digunakan untuk mengetahui kerugian saluran akibat kontribusi daya sebuah generator pada sistem kelistrikan dan mengacu pada referensi [23]. Algoritma *power flow tracing* dapat disederhanakan sebagai berikut:

1. Membentuk matriks aliran daya.
2. Membentuk matriks *net injection*.
3. Membentuk matriks *passing flow*.
4. Membentuk matriks kontribusi.
5. Proses *power flow tracing*.
6. Menghitung daya kontribusi sisi kirim, terima, dan kerugian saluran.

3.3.1 Matriks Aliran Daya (*Flow Matrices*)

Sebagai masukan awal, matriks aliran daya bisa berasal dari perhitungan aliran daya atau hasil *state estimation*. Matriks aliran daya berdimensi $n \times l$, dimana baris n berukuran sejumlah bus dan kolom l berukuran sejumlah saluran. Setiap kolomnya hanya memiliki 2 elemen yang tidak bernilai nol dan seharusnya salah satunya bernilai positif dan lainnya bernilai negatif. Elemen positif merepresentasikan sisi kirim dan elemen negatif merepresentasikan sisi terima. Untuk mempermudah proses *tracing*, daya aktif dan daya reaktif dibentuk pada matriks aliran daya yang berbeda (FP dan FQ), seperti ditunjukkan pada gambar 3.4.

bus\saluran		1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
FP	1	60,94	223,56	114,96	0,00	0,00
	2	-60,20	0,00	0,00	174,20	0,00
	3	0,00	-217,24	0,00	0,00	-82,76
	4	0,00	0,00	-112,08	-171,66	83,74

bus\saluran		1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
FQ	1	7,24	135,18	52,21	0,00	0,00
	2	-1,61	0,00	0,00	121,54	0,00
	3	0,00	-62,03	0,00	0,00	-37,97
	4	0,00	0,00	-28,61	-99,28	47,89

Gambar 3.5 Contoh matriks aliran daya untuk 4 bus 5 saluran

3.3.2 Matriks *Net Injection*

Matriks *net injection* memiliki dimensi $n \times 1$, merepresentasikan bus tersebut menyuplai atau menyerap daya. Jika elemen matriks bernilai positif menunjukkan bahwa bus tersebut menyuplai daya ke sistem, sedangkan jika elemen matriks bernilai negatif menunjukkan bus tersebut menyerap daya dari sistem. Untuk menentukan nilai elemen matriks *net injection*, berdasarkan persamaan 3.1:

$$M_i = \sum_{l \in \Psi_i} f_{il} \quad (3.1)$$

Dimana: $i = n$ b
 $\Psi_i = s$ s y t h d b i

	MP		MQ
1	399,46	1	194,63
2	114,00	2	119,93
3	-300,00	3	-100,00
4	-200,00	4	-80,00

Gambar 3.6 Contoh matriks *net flow injection*

3.3.3 Matriks *Passing Flow*

Matriks *passing flow* memiliki dimensi yang sama dengan matriks *net injection*, yaitu $n \times 1$. Matriks *passing flow* menunjukkan jumlah total daya yang menuju atau keluar dari bus. Nilai elemen matriks *passing flow* dapat ditentukan berdasarkan persamaan 3.2:

$$F_i = \begin{cases} \sum_{l \in \Psi_{pi}} f_{il} & M_i \geq 0 \\ \sum_{l \in \Psi_{ni}} -f_{il} & M_i \leq 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Dimana: $\Psi_i = s$ s y t h d b i
 $\Psi_p = s$ y m d k d b i
 $\Psi_p = s$ y m d m k b i

3.3.4 Matriks Kontribusi

Setelah matriks aliran daya, *net injection*, dan *passing flow* terbentuk, tahapan selanjutnya membentuk matriks kontribusi yang mengubah elemen-elemen matriks menjadi bentuk pecahan. Matriks ini

merepresentasikan jenis dan proporsi daya yang disuplai/diterima bus. Matriks kontribusi ini yang akan digunakan dalam proses *power flow tracing*, sehingga diketahui kontribusi daya setiap generator pada tiap-tiap saluran dan bus. Matriks kontribusi daya dapat dibagi menjadi 2, yaitu matriks kontribusi daya aktif (**AP**) dan matriks kontribusi daya reaktif (**AQ**), untuk mempermudah analisis kesalahan saat penyusunan program. Untuk mengubah matriks aliran daya menjadi matriks kontribusi dapat menggunakan persamaan:

3.3.3.1 Kontribusi Faktor pada Sisi Kirim

$$A_{fil} = \begin{cases} \frac{M_i}{F_i}, & M_i > 0 \\ \alpha, & M_i < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

3.3.3.2 Kontribusi Faktor pada Sisi Terima

$$A_{fjl} = \frac{f_{jl}}{F_j} \quad (3.4)$$

Dimana: A_f = Matriks Kontribusi untuk bus i saluran l
 A_f = Matriks Kontribusi untuk bus j saluran l
 M_i = Matriks *net injection* bus i
 F_i = Matriks *passing flow* bus sisi kirim i
 F_j = Matriks *passing flow* bus sisi terima j
 f_j = Nilai matriks aliran daya untuk bus j dan saluran l
 i = indeks bus sisi kirim
 j = indeks bus sisi terima
 α = konstanta yang bernilai kecil dipilih 10^{-8}

Nilai α merupakan konstanta dengan nilai yang sangat kecil disesuaikan dengan keinginan ketelitian proses *power flow tracing*. Konstanta tersebut hanya digunakan sebagai penanda sisi terima/kirim pada proses *power flow tracing*, pada akhir iterasi, α akan dieliminasi menjadi nol.

bus\saluran		1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
AP	1	1	1	1	0	0
	2	-0,35	0	0	0,65	0
	3	0	-0,72	0	0	-0,28
	4	0	0	-0,40	-0,60	α

Gambar 3.7 Contoh matriks kontribusi daya aktif

bus\saluran		1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
AQ	1	1	1	1	0	0
	2	-0,01	0	0	0,99	0
	3	0	-0,62	0	0	-0,38
	4	0	0	-0,22	-0,78	0

Gambar 3.8 Contoh matriks kontribusi daya reaktif

3.3.5 Proses *Power Flow Tracing*

Setelah terbentuk matriks kontribusi melalui proses sebelumnya, proses *tracing* dilakukan berdasarkan matriks kontribusi. Matriks kontribusi berisi elemen positif dan negatif, baik pada matriks kontribusi daya aktif maupun reaktif. Untuk mengetahui kontribusi setiap generator, proses *tracing* bertujuan mengeliminasi elemen negatif yang ada di matriks kontribusi. Sehingga pada akhir proses *tracing* yang tersisa hanya elemen positif, yang berada pada bus (baris) yang terhubung generator. Secara umum, algoritma proses *tracing* dijabarkan sebagai berikut:

1. Mencari bus *source* yang semua elemen selain nol bernilai positif
2. Untuk setiap elemen positif bus *source*
 - a. Dapatkan indeks elemen positif *i* (baris) dan *j* (kolom)
 - b. Pada indeks *j* (kolom elemen positif) cari semua elemen negatif
 - c. Untuk setiap elemen negatif pada kolom *j*
 - i. Dapatkan indeks *m* (baris) elemen negatif
 - ii. jika pada baris *m* tidak memiliki elemen negatif, maka elemen pada indeks baris *m* dan kolom *j* disubstitusi menjadi nol
 - iii. jika baris *m* memiliki elemen positif, maka untuk setiap elemen positif
 - iii.a. Dapatkan indeks *n* (kolom elemen positif) pada baris *m*
 - iii.b. Cari kontribusi akibat elemen negatif dengan persamaan 3.5

$$k_{in} = k_{in} - k_{ij} \cdot k_{mj} \quad i = 1, N_B \quad i \neq m \quad (3.5)$$

- iii.b. Ulangi **langkah iii.b** untuk setiap elemen positif pada baris *m*
- iii.c. Jika setiap elemen positif pada baris *m* telah dihitung kontribusi akibat elemen negatif pada indeks *m, j*, maka elemen negatif disubstitusi menjadi nol
- iii.d. Akhir *tracing* untuk elemen negatif indeks *m, j*
- iv. Ulangi **langkah i** untuk setiap elemen negatif pada kolom *j*

- d. Ulangi **langkah a** untuk setiap baris source
3. Jika masih terdapat elemen negatif pada matriks kontribusi, maka ulangi **langkah 1**
4. Jika tidak tersisa elemen negatif pada matriks kontribusi, maka substitusi nilai α dengan nol dan proses *tracing* berakhir

bus\saluran		1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
AP	1	1	1	1	0,346	0,604
	2	0	0	0	0,654	0,396
	3	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0
bus\saluran		1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
AQ	1	1	1	1	0,013	0,234
	2	0	0	0	0,987	0,766
	3	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0

Gambar 3.9 Contoh matriks kontribusi setelah proses *tracing*

3.3.6 Menghitung Kontribusi Kerugian Daya

Setelah melalui proses *tracing*, matriks kontribusi hanya memiliki elemen positif yang hanya terdapat pada bus yang terhubung generator. Pada akhir proses *tracing* matriks kontribusi hanya berisi rasio kontribusi perlu diubah kembali menjadi bentuk daya dengan persamaan 3.6.

$$T = A \times \text{diag}(F) \quad (3.6)$$

Dimana: T = matriks $N_B \times N_L$ yang berisi daya yang dikontribusikan setiap bus i pada tiap-tiap saluran l .

A = matriks kontribusi akhir proses *tracing*, AP untuk daya aktif dan AQ untuk daya reaktif.

$\text{diag}(F)$ = matriks $N_L \times N_L$ yang elemen diagonal berisi daya pada sisi kirim/terima.

Pada tugas akhir ini *power flow tracing* digunakan untuk mendapatkan nilai kerugian saluran akibat kontribusi daya sebuah generator. Sehingga menggunakan persamaan 3.6, kita bisa mendapatkan 2 matriks T yaitu

1. $T_{\text{kirim}} \rightarrow$ dengan isi elemen matriks $\text{diag}(F)$ daya sisi kirim.
2. $T_{\text{terima}} \rightarrow$ dengan isi elemen matriks $\text{diag}(F)$ daya sisi terima.

Sehingga selisih kedua matriks T tersebut didapatkan kerugian saluran, sesuai persamaan

$$Loss = T_{\text{ kirim }} + T_{\text{ terima }} \quad (3.7)$$

Dimana: $Loss$ = matriks $N_B \times N_L$ yang berisi kerugian saluran akibat kontribusi daya setiap bus i pada tiap-tiap saluran l .

$T_{\text{ kirim }}$ = matriks $N_B \times N_L$ yang matriks diag(F) berisi daya sisi kirim.

$T_{\text{ terima }}$ = matriks $N_B \times N_L$ yang matriks diag(F) berisi daya sisi terima.

Pada *Loss Matrix* menggambarkan kerugian saluran yang diakibatkan oleh daya yang dikontribusikan bus i yang mengalir pada setiap saluran l . Total setiap baris merepresentasikan total kerugian saluran yang dikontribusikan oleh bus tersebut.

bus\saluran		1_2	1_3	1_4	2_4	3_4	
TP_{kirim}	1	60,937	223,561	114,958	60,197	50,582	
	2	0	0	0	114,000	33,154	
	3	0	0	0	0	0	
	4	0	0	0	0	0	
bus\saluran		1_2	1_3	1_4	2_4	3_4	
TP_{terima}	1	-60,197	-217,242	-112,076	-59,320	-49,991	
	2	0	0	0	-112,340	-32,766	
	3	0	0	0	0	0	
	4	0	0	0	0	0	
bus\saluran		1_2	1_3	1_4	2_4	3_4	Total (MW)
LossP	1	0,740	6,319	2,882	0,877	0,591	
	2	0	0	0	1,660	0,387	
	3	0	0	0	0	0	
	4	0	0	0	0	0	

Gambar 3.10 Contoh matriks $T_{\text{ kirim }}$, $T_{\text{ terima }}$, dan $Loss$ untuk daya aktif

3.4 Impedansi Ekuivalen Berdasarkan *Losses Concept* [5]

Pada tugas akhir ini bertujuan menyederhanakan analisis dari model multimesin menjadi *single-machine*. Salah satu parameter yang harus dicari pada model *single-machine* adalah impedansi ekuivalen. Mengacu pada referensi [5], impedansi ekuivalen bisa dihitung berdasarkan konsep kerugian saluran dengan tahapan sebagai berikut:

1. Dapatkan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) yang dibangkitkan oleh generator yang diamati. Selain itu, dapatkan kerugian saluran daya aktif (P_L) dan kerugian saluran daya reaktif (Q_L) melalui pendekatan *power flow tracing*.

2. Hitung nilai arus mesin yang diamati menggunakan persamaan:

$$I = \frac{P - jQ}{\sqrt{3} \cdot V_i^*} \quad (3.8)$$

Dimana: I = Arus mesin yang diamati
 $P - jQ$ = Daya kompleks yang dibangkitkan Mesin yang diamati
 V_i^* = Tegangan konjugat kompleks pada bus mesin yang diamati.

3. Hitung nilai R_{eq} dan X_{eq} menggunakan konsep losses sesuai dengan persamaan:

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} = \frac{P_L + jQ_L}{|I|^2} \quad (3.9)$$

Dimana: P_L = kerugian saluran daya aktif
 Q_L = kerugian saluran daya reaktif
 Z_{eq} = Impedansi ekuivalen saluran.

Impedansi ekuivalen hasil perhitungan dengan konsep kerugian saluran akan digunakan untuk menghitung parameter model dinamik generator.

3.5 Pemodelan Dinamik Generator

Tahapan kedua pada tugas akhir ini adalah memodelkan model dinamik generator. Pemodelan dinamik generator dilakukan dengan bantuan program SIMULINK. Model dinamik generator dimodelkan sebagai diagram blok domain laplace. Hal ini lebih mudah dibandingkan persamaan differensialnya pada domain waktu.

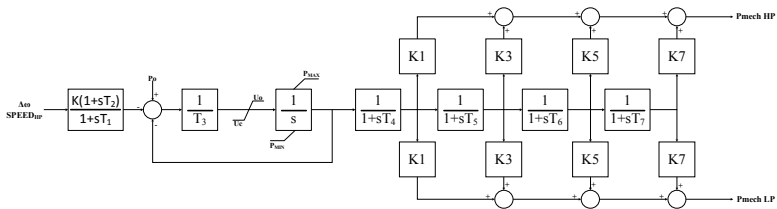
Pemodelan dilakukan terlebih dahulu sebelum proses optimasi parameter PSS karena parameter dan model yang dioptimasi oleh metode optimasi mengacu pada tahapan ini. Oleh karena itu, pemodelan model dinamik perlu dilakukan terlebih dahulu sebelum metode optimasi.

Pada generator Heffron-Phillips dan DeMello-Concordia terdapat konstanta K1-K6 yang berhubungan dengan parameter impedansi ekuivalen saluran. Oleh karena itu, hasil *power flow tracing* dan perhitungan impedansi ekuivalen dengan konsep kerugian saluran berguna untuk penentuan parameter generator.

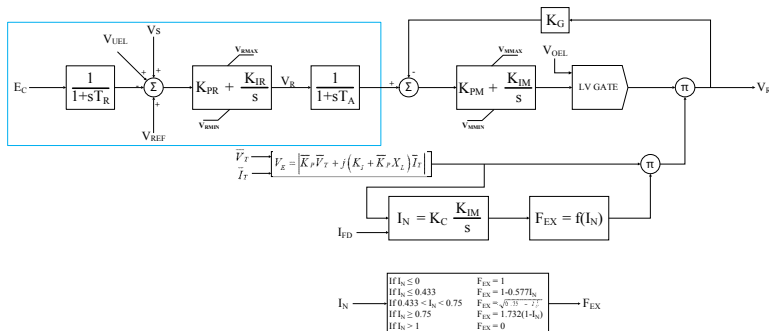
Model generator yang dipilih pada tugas akhir ini mengacu pada referensi model generator Heffron-Phillips [10] dan DeMello-Concordia [11]. Namun, untuk mendekati respon yang ada pada kondisi sebenarnya,

model generator Heffron-Phillips dan DeMello-Concordia ditambahkan model peralatan kontrol tambahan, yaitu governor, AVR, dan PSS. Generator Pacitan menggunakan peralatan kontrol sebagai berikut:

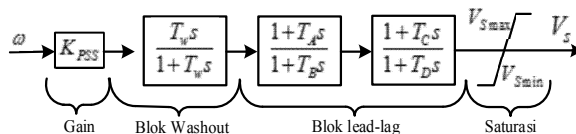
1. Governor tipe IEEE G1
2. AVR tipe IEEE ST4B
3. PSS konvensional



Gambar 3.11 Model dinamik governor tipe IEEE G1

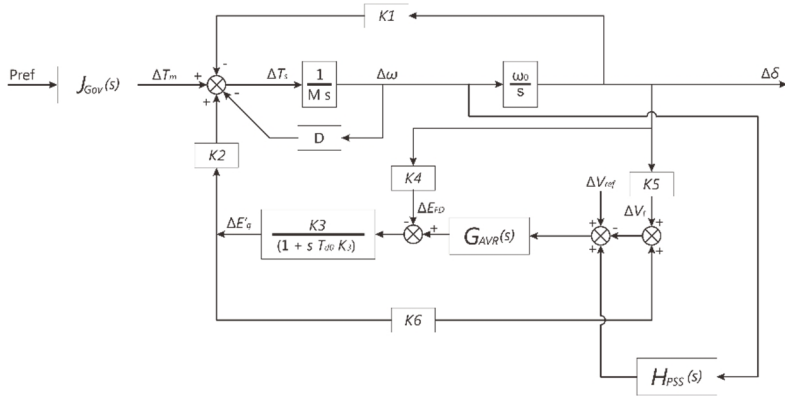


Gambar 3.12 Model dinamik AVR ST4B yang disederhanakan



Gambar 3.13 Model dinamik PSS konvensional

Disebabkan sulitnya mencari nilai parameter dan kelengkapam data yang tersedia, pada tugas akhir ini dilakukan pendekatan, berupa model AVR IEEE ST4B yang digunakan hanya pada daerah berwarna biru. Model linier generator lengkap ditunjukkan oleh gambar 3.14.



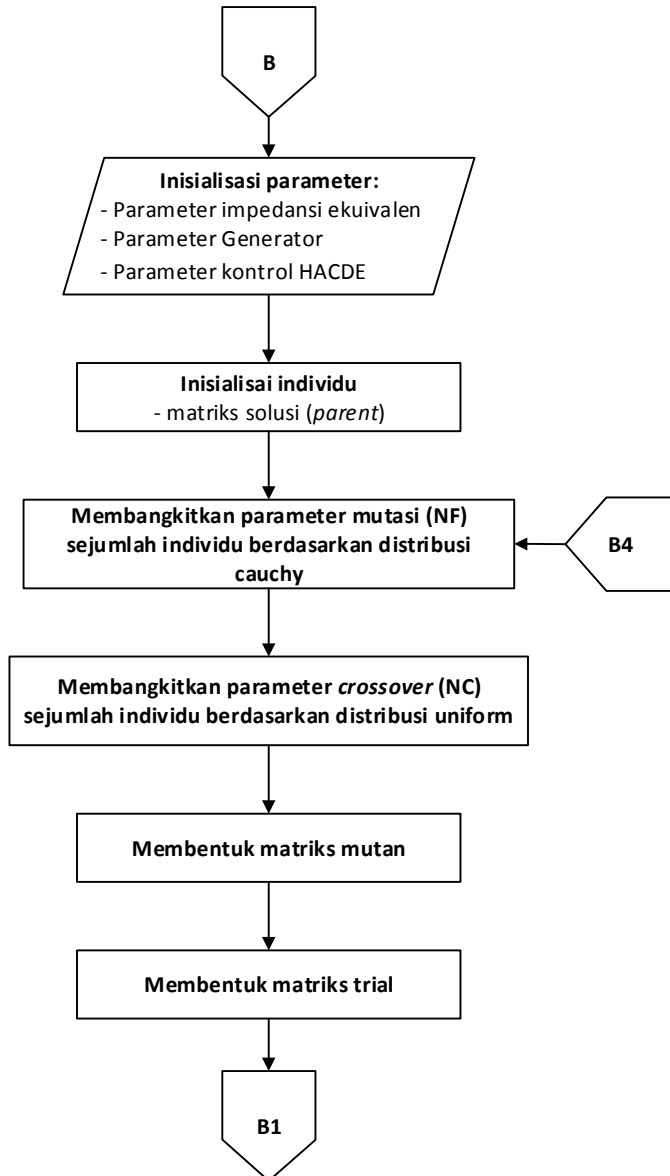
Gambar 3.14 Model Linier Generator Pacitan

3.6 Pemodelan Metode Optimasi *Hybrid Adaptive Chaotic-DE*

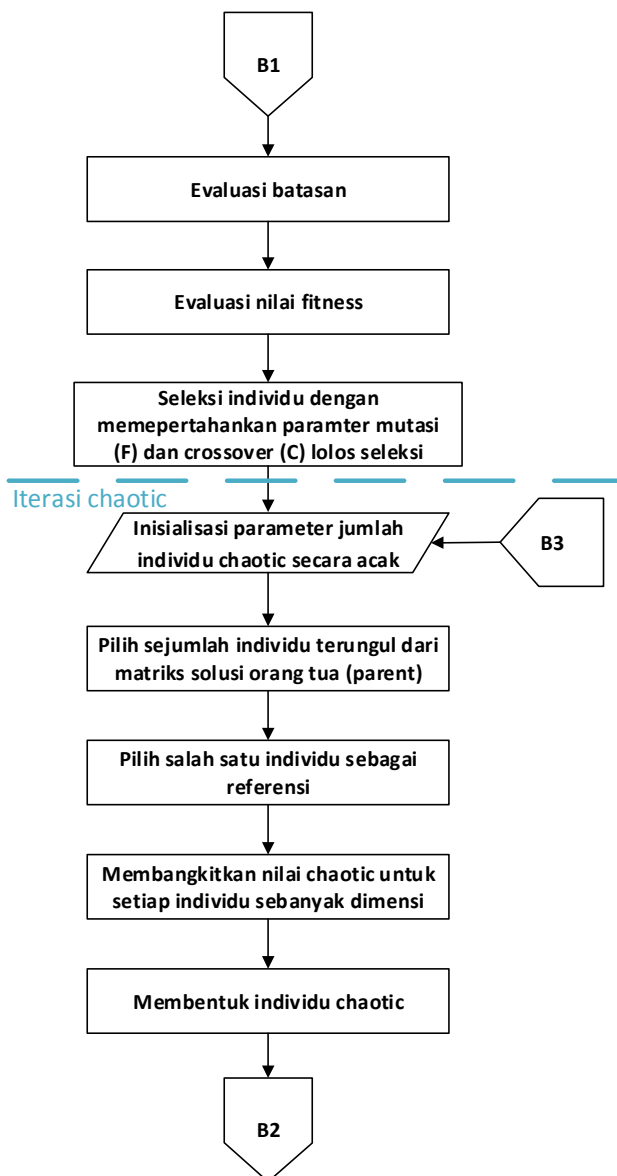
Sebuah metode optimasi memiliki dua kemampuan untuk mendapatkan nilai optimalnya, yaitu kemampuan eksplorasi dan eksploitasi. Kemampuan eksplorasi berguna untuk menghindari local optima (memperluas daerah pencarian). Sedangkan kemampuan eksploitasi berguna untuk mendapatkan sebuah nilai optimal pada setiap iterasinya. Metode optimasi berjalan baik ketika kemampuan eksplorasi dan eksploitasi seimbang.

Sehingga pada tahapan ketiga setelah terbentuk model dinamik generator pada SIMULINK, dilakukan pemodelan metode optimasi *hybrid adaptive chaotic differential evolution* (HACDE). Metode optimasi modifikasi HACDE berdasarkan model DE/rand/1/bin dengan tambahan terinspirasi dari fungsi matematis *chaotic* dan parameter kontrol DE yang adaptif. Metode HACDE memiliki performa yang lebih baik dalam hal mendapatkan nilai konvergensi dan kecepatan konvergensi.

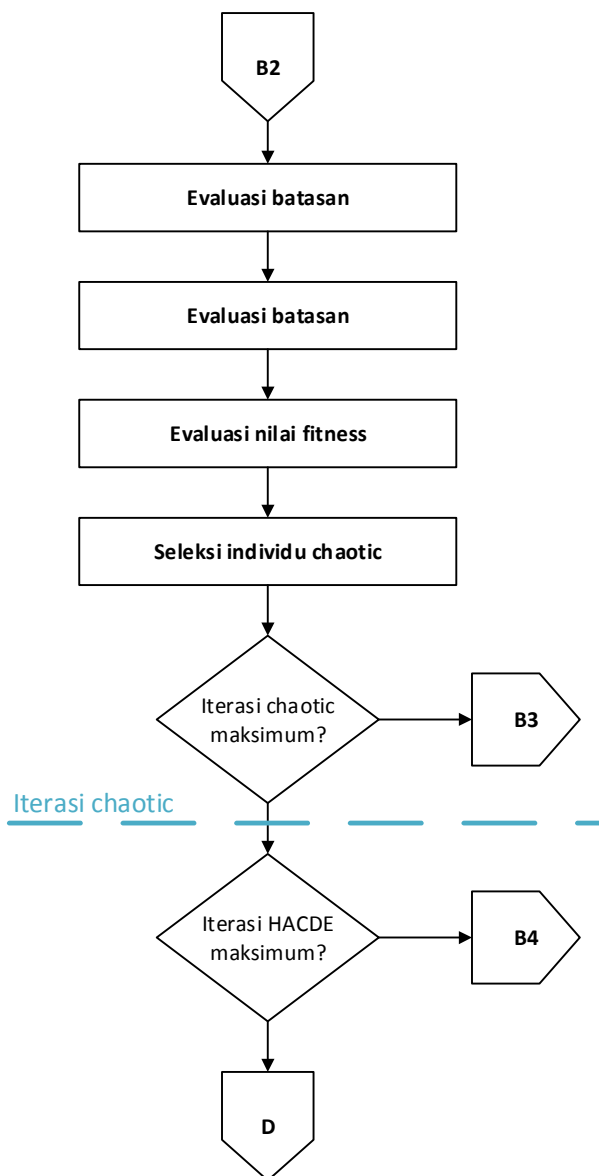
Pemodelan metode optimasi HACDE pada penalaan PSS bertujuan untuk mempermudah mendapatkan nilai parameter PSS yang optimal dengan keadaan yang diinginkan optimal tanpa harus mencoba semua kemungkinan secara manual, melainkan perhitungan diganti dengan metode optimasi HACDE yang melalui proses mutasi (*mutation*), pindah silang (*crossover*), dan iterasi *chaotic* yang nantinya dievaluasi sesuai dengan batasan (*constraint*) dan fungsi objektif.



Gambar 3.15 Diagram Alir HACDE



Gambar 3.16 Diagram Alir HACDE lanjutan



Gambar 3.17 Diagram Alir HACDE lanjutan

Untuk mempermudah pemodelan HACDE, diagram alir di atas dapat disederhanakan menjadi:

1. Penentuan parameter masukan awal
2. Inisialisasi populasi
3. Inisialisasi parameter mutasi dan pindah silang
4. Membentuk populasi mutasi
5. Membentuk populasi trial
6. Evaluasi populasi
7. Iterasi *chaotic*
8. Iterasi utama DE/rand/1/bin

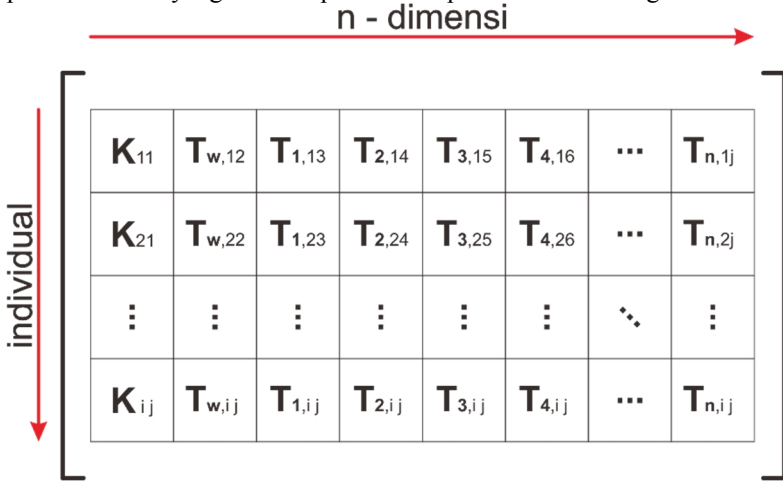
3.6.1 Penentuan Parameter Masukan Awal

Penentuan parameter masukan awal dibutuhkan sebagai nilai variabel-variabel yang dioperasikan oleh HACDE, Variabel awal yang dimaksud yaitu:

- a) Parameter dinamik generator
Berisi nilai dari variabel parameter dinamik generator, seperti nilai parameter mesin, parameter governor, parameter AVR, impedansi ekuivalen, nilai konstanta K1-K6, dan sebagainya. Sedangkan parameter PSS sebagai objek yang cari nilai optimalnya.
- b) Ukuran Populasi
Ukuran populasi merupakan kumpulan individu sebagai kandidat solusi nilai optimal PSS. Masing-masing individu terdiri dari variabel PSS yang akan dioptimalkan.
- c) Jumlah Generasi
Jumlah generasi atau disebut iterasi maksimum, merupakan nilai yang digunakan sebagai kriteria berhenti pencarian nilai optimal.
- d) Parameter kontrol
Selain parameter kontrol jumlah generasi, parameter yang berpengaruh signifikan adalah nilai faktor mutasi (F) dan pindah silang (C). Pada umumnya nilai berkisar F [0.4,0.9] dan C [0.1,1].
- e) Jumlah iterasi maksimum chaotic
Iterasi *chaotic* harus ditentukan guna membatasi waktu pencarian, karena iterasi *chaotic* berada di dalam iterasi utama DE/rand/1/bin.

3.6.2 Inisialisasi Populasi

Seperti yang dijelaskan pada subbab sebelumnya, bahwa populasi merupakan kumpulan dari individu yang akan diolah oleh HACDE. Masing-masing individu berisi variabel PSS yang akan dioptimasi, sehingga mungkin salah satu individu menjadi kandidat solusi nilai optimal. Operasi HACDE pada matlab sehingga representasi populasi HACDE berbentuk matriks, yang disebut matriks solusi seperti pada gambar 3.15. Pada matriks solusi individu diindekskan oleh baris dan parameter PSS yang akan dioptimasi direpresentasikan sebagai kolom.



Gambar 3.18 Inisialisasi Populasi pada HACDE

3.6.3 Inisialisasi parameter mutasi dan pindah silang

Pengaturan parameter kontrol DE sangat berpengaruh pada performa optimasi, mekanisme parameter adaptif dimaksudkan untuk efisiensi DE [26]. Mekanisme adaptif terinspirasi dari referensi [29], di mana setiap individu memiliki parameter mutasi dan pindah silang masing-masing. Saat inisialisasi parameter mutasi (F_i^t) 0.4 dan crossover (C_i^t) 0.9. Umumnya distribusi normal dengan mean 0.5 dan standar deviasi 0.3 menjanjikan pendekatan parameter adaptif yang efektif [30]. Namun, Distribusi *Cauchy* lebih menjanjikan diversivitas faktor mutasi untuk menghindari konvergen yang terlalu awal [30]. Sehingga setiap iterasi tiap-tiap individu memiliki kemungkinan parameter mutasi dan pindah silang baru yang berbeda-beda (NF dan NC) dengan kemungkinan

0,1. Berdasarkan referensi [26, 32-33] diadaptasi guna membentuk algoritma HACDE.

$$NF_i^t = \begin{cases} randc(0.5, 0.3) & \text{jika } rand(0, 1) < 0.1 \\ F_i^t & \text{selain itu} \end{cases} \quad (3.10)$$

$$NC_i^t = \begin{cases} rand(0, 1) & \text{jika } rand(0, 1) < 0.1 \\ C_i^t & \text{selain itu} \end{cases}$$

Ketika proses seleksi pengetahuan tentang individu yang unggul harus tetap dipertahankan dan diteruskan pada generasi selanjutnya, sehingga individu selanjutnya memiliki kemungkinan bertahan yang lebih besar [30]. Jadi pada proses seleksi, nilai faktor mutasi dan pindah silang harus diperbaharui untuk generasi berikutnya.

$$F_i^{t+1} = \begin{cases} NF_i^t & \text{jika } f(U_i^t) \text{ lebih baik dari } f(X_i^t) \\ F_i^t & \text{selain itu} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$C_i^{t+1} = \begin{cases} NC_i^t & \text{jika } f(U_i^t) \text{ lebih baik dari } f(X_i^t) \\ C_i^t & \text{selain itu} \end{cases}$$

3.6.4 Membentuk Populasi Mutasi

Populasi mutasi (\mathbf{v}) memiliki representasi seperti matriks solusi orang tua (\mathbf{x}). Pembentukan matriks populasi mutasi berguna untuk membentuk kandidat solusi baru yang berbeda nilai dari orang tua (\mathbf{x}). Namun, nilai yang dioperasikan untuk membentuk matriks mutasi mereferensi dari matriks orang tua (\mathbf{x}) dengan persamaan.

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{r1} + NF_i \cdot (\mathbf{x}_{r2} - \mathbf{x}_{r3}) \quad (3.12)$$

Dimana: \mathbf{v}_i = matriks mutasi.
 $r1, r2, r3$ = nilai random integer dari individu yang dipilih pada operasi mutase dengan syarat $i \neq r1 \neq r2 \neq r3$.
 NF_i = nilai faktor mutasi adaptif.

3.6.5 Membentuk Populasi *Trial*

Populasi *trial* (\mathbf{u}) memiliki dimensi matriks seperti matriks solusi orang tua (\mathbf{x}) dan mutasi (\mathbf{v}). Pembentukan matriks *trial* berguna untuk membentuk kandidat solusi baru yang menjamin perbedaan nilai dari orang tua (\mathbf{x}). Namun, nilai yang dioperasikan untuk membentuk matriks mutasi mereferensi dari matriks mutasi (\mathbf{v}) dengan persamaan.

$$u_{ij} \begin{cases} v_{ij} & \text{jika } r_{cj} < C \text{ atau } j = J_r \\ x_{ij} & \text{selain itu} \end{cases} \quad (3.13)$$

Dimana: u_{ij} = elemen matriks trial.
 v_{ij} = elemen matriks mutasi.
 x_{ij} = elemen matriks orang tua.
 r_{jc} = nilai random uniform berkisar [0,1] yang dibangkitkan untuk setiap elemen matriks.
 J_r = nilai random integer dengan nilai berkisar [1,dimensi].

3.6.6 Evaluasi Populasi

Evaluasi populasi dilakukan agar mengetahui kualitas individu pada populasi yang telah terbentuk dalam bentuk sebuah nilai yang dinamakan nilai "*fitness*". Nilai *fitness* didapatkan berdasarkan sebuah fungsi yang disebut fungsi objektif/tujuan. Setiap permasalahan memiliki fungsi objektif masing-masing untuk mencapai kondisi optimal. Nilai *fitness* yang optimal dapat berupa kasus memaksimal atau meminimal. sehingga diharapkan pada proses evaluasi ini kandidat yang memiliki nilai *fitness* yang bagus dipertahankan pada generasi selanjutnya.

3.6.7 Iterasi *Chaotic*

Berdasarkan referensi [26, 32-33] yang telah diadaptasi pada pembuatan HACDE, iterasi *chaotic* berada setelah operasi seleksi populasi *trial*. Iterasi *chaotic* berguna untuk mengeksplorasi nilai yang telah tersedia setelah proses seleksi populasi *trial*. Namun, dengan iterasi yang jauh dibandingkan iterasi DE utama, sehingga tidak mengkonsumsi waktu komputasi.

%% Iterasi Chaotic $K^0 = \text{rand}(0,1), \quad K^0 \neq 0.25, 0.5, 0.75, 1$ $p = \text{rand}(2/\text{NP}, 0.1)$ **While** not (kriteria stop)Pilih acak sebuah individu X_p^t dari terunggul $100p\%$ Untuk setiap dimensi $j \in [1, n]$ individu selain X_p^t Polaritas = $(-1)^{r_{(1,2)}-1}$

$$E_{i,j}^n = X_{i,j}^t + K^n \cdot (X_p^t - X_{i,j}^t) \cdot p \quad ;$$

Individu chaotic selanjutnya

untuk setiap indeks populasi (**vektor individu dan chaos**)**if** $f(E_i) > f(x_i)$ **then** $x_i \leftarrow E_i$ indeks populasi berikutnya

Gambar 3.19 Algoritma iterasi *chaotic***3.6.8 Iterasi Utama DE**

Iterasi adalah pengulangan suatu proses dengan nilai baru yang didapatkan dari hasil proses pada iterasi sebelumnya. Iterasi pada HACDE seperti DE pada umumnya berjenis *generation replacement*, individu yang unggul pada proses seleksi akan dipertahankan untuk iterasi/generasi selanjutnya. Iterasi utama HACDE menggunakan dasar algoritma varian DE/rand/1/bin. Seperti yang telah dijelaskan pada Bab 2.

3.7 Fungsi Objektif [34]

Fungsi objektif (J) adalah fungsi yang nilainya (*fitness value*) akan dijadikan tujuan/rujukan proses optimasi. Proses optimasi bisa berupa kasus meminimalkan atau memaksimalkan nilai fungsi objektif.

Eigenvalue terdiri dari komponen real dan imajiner, pada tugas akhir ini akan digunakan fungsi objektif untuk memaksimalkan nilai penjumlahan kedua komponen eigenvalue tersebut. Sehingga PSS memiliki redaman osilasi yang optimal. Fungsi objektif pada tugas akhir ini dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda_{ik} = \sigma_{ik} + j\omega_{ik} \quad (3.14)$$

$$\xi_{ik} = -\frac{\sigma_{ik}}{\sqrt{\sigma_{ik}^2 + \omega_{ik}^2}} \quad (3.15)$$

$$J = -maks(\sigma_{ik}) + min(\xi_{ik}) \quad (3.16)$$

Dimana: λ_{ik} = eigenvalue ke- k dari individu ke- i
 σ_{ik} = nilai real eigenvalue ke- k dari individu ke- i
 ω_{ik} = nilai imajiner eigenvalue ke- k dari individu ke- i
 ξ_{ik} = *damping ratio* eigenvalue ke- k dari individu ke- i

3.8 Batasan (*Constraint*)

Batasan atau *constraint* adalah aturan berupa nilai parameter yang harus dipenuhi pada suatu proses optimasi sehingga dapat dikatakan layak sebagai kriteria solusi untuk diseleksi. Batasan pada umumnya dapat dibagi menjadi:

1. *Equality constraint*
2. *Inequality constraint*

Namun, pada kasus tertentu mungkin hanya *inequality constraint* saja yang ada. Batasan membuat proses seleksi menjadi lebih rumit karena adanya suatu kondisi yang harus dipenuhi. Batasan yang digunakan pada tugas akhir ini adalah:

$$\begin{aligned}
 Kpss_i^{min} &\leq Kpss_i \leq Kpss_i^{max} \\
 Tw_i^{min} &\leq Tw_i \leq Tw_i^{max} \\
 T_{1i}^{min} &\leq T_{1i} \leq T_{1i}^{max} \\
 T_{2i}^{min} &\leq T_{2i} \leq T_{2i}^{max} \\
 T_{3i}^{min} &\leq T_{3i} \leq T_{3i}^{max} \\
 T_{4i}^{min} &\leq T_{4i} \leq T_{4i}^{max}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Batasan tersebut merupakan batasan nilai parameter PSS yang diperbolehkan untuk mencapai nilai optimal.

Tabel 3.1 Jangkauan Tipikal Parameter PSS [25]

Parameter	Kpss	Tw	T1	T2	T3	T4
Maksimum	50	5	1,5	0,1	1,5	0,1
Mininum	0,001	4,5	0,06	0,01	0,06	0,01

3.9 Simulasi Domain Waktu [35]

Untuk menunjukkan performa hasil optimasi menggunakan fungsi objektif berdasarkan eigenvalue, model dinamik generator dengan penambahan PSS disimulasi pada domain waktu menggunakan bantuan SIMULINK. parameter yang diamati berupa deviasi sudut rotor ($\Delta\delta$), deviasi kecepatan rotor ($\Delta\omega$), dan deviasi tegangan terminal (ΔV_t) Parameter evaluasi domain waktu yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *integral time absolute error* (ITAE) dari kecepatan sudut rotor dengan persamaan:

$$ITAE = \int_0^T t |e_{\omega}(t)| dt \quad (3.18)$$

Dimana: e_{ω} = error/deviasi kecepatan sudut rotor dengan nilai referensi saat *steady state*

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini diuraikan analisis hasil simulasi pada tugas akhir ini sesuai dengan pemodelan pada bab-bab sebelumnya. Simulasi dilakukan untuk mendapatkan hasil pemodelan sistem yang teruraikan pada bab-bab sebelumnya, setelah simulasi dijalankan dan menghasilkan nilai perhitungan, dilakukan analisis untuk mengetahui kesesuaian dari pemodelan sistem yang telah dibuat. Pemodelan sistem diolah dan disusun dengan bantuan program MATLAB dan SIMULINK. Simulasi dan analisis dibagi menjadi beberapa poin, yaitu:

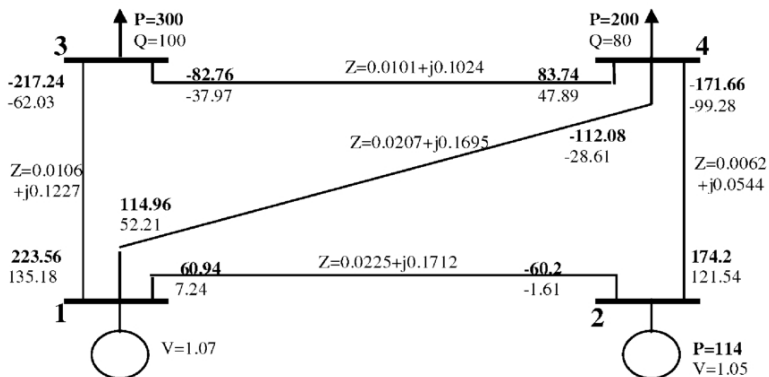
1. *Power flow tracing*
 - 1.1 Kasus A: sistem sederhana 4 bus
 - 1.2 Kasus B: sistem kelistrikan IEEE 5 bus
 - 1.3 Kasus C: sistem kelistrikan IEEE 6 bus
2. Reduksi jaringan menggunakan konsep kerugian saluran
3. Optimasi parameter PSS
 - 3.1 Optimasi menggunakan HACDE
 - 3.2 Perbandingan dengan metode optimasi lain
 - 3.3 Simulasi respon domain waktu

4.1 *Power Flow Tracing (PFT)*

Pada subbab ini akan diuraikan hasil *power flow tracing* pada beberapa sistem kelistrikan sederhana guna mengamati keabsahan metode *power flow tracing*. Pada sistem kelistrikan skala besar beberapa karakteristik aliran daya terjadi di beberapa titik. Dikarena sulit mengamati kesalahan kalkulasi jika pada sistem kelistrikan skala besar, untuk memudahkan pengamatan permasalahan perbedaan karakteristik aliran daya dipisah menjadi sistem-sistem kelistrikan yang lebih sederhana. Pengujian metode dilakukan pada beberapa sistem standar IEEE yang memiliki karakteristik aliran daya berbeda.

4.1.1 Kasus A: *Power Flow Tracing* Berdasarkan Sistem Sederhana 4 bus

Sistem kelistrikan sederhana 4 bus memiliki karakteristik aliran daya aktif dan reaktif mengalir ke arah yang sama, seperti pada gambar 4.1. Sistem kelistrikan 4 bus sesuai jika dijadikan sebagai contoh perhitungan *power flow tracing* karena sangat sederhana.



Gambar 4.1 Sistem kelistrikan sederhana 4 bus

4.1.1.1 Hasil perhitungan aliran daya sistem sederhana 4 bus

Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya Sistem Sederhana 4 Bus

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method

Maximum Power Mismatch = $1.28332e-10$

No. of Iterations = 5

Bus	Voltage		Load		Generation		Injected
No.	Mag.	Angle Degree	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar
1	1.070	0	0	0	399,456	194,621	0
2	1.050	-5,245	0	0	114,000	119,934	0
3	0,925	-15,224	300,000	100,000	0	0	0
4	0,98	-10,106	200,000	80,000	0	0	0
Total			500	180	513,456	314,555	0
Total Loss					13,456	134,555	

4.1.1.2 Hasil PFT sistem sederhana 4 bus

bus\saluran	1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
1	1	1	1	0	0
2	-0,35	0	0	0,65	0
3	0	-0,72	0	0	-0,28
4	0	0	-0,40	-0,60	α

Gambar 4.2 Matriks faktor kontribusi daya aktif 4 bus sebelum PFT

bus\saluran	1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
1	1	1	1	0	0
2	-0,01	0	0	0,99	0
3	0	-0,62	0	0	-0,38
4	0	0	-0,22	-0,78	α

Gambar 4.3 Matriks faktor kontribusi daya reaktif 4 bus sebelum PFT

bus\saluran	1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
1	1	1	1	0,346	0,604
2	0	0	0	0,654	0,396
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
Total	1	1	1	1	1

Gambar 4.4 Matriks faktor kontribusi daya aktif 4 bus setelah PFT

bus\saluran	1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
1	1	1	1	0,013	0,234
2	0	0	0	0,987	0,766
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
Total	1	1	1	1	1

Gambar 4.5 Matriks faktor kontribusi daya reaktif 4 bus setelah PFT

4.1.1.3 Hasil PFT daya aktif sistem sederhana 4 bus

bus\saluran	1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
1	60,937	223,561	114,958	60,197	50,582
2	0	0	0	114,000	33,154
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0

Gambar 4.6 Daya aktif kontribusi sisi kirim 4 bus

**TAP
Terima**

bus\saluran	1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
1	-60,197	-217,242	-112,076	-59,320	-49,991
2	0	0	0	-112,340	-32,766
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0

Gambar 4.7 Daya aktif kontribusi sisi terima 4 bus

Loss AP

bus\saluran	1_2	1_3	1_4	2_4	3_4	Total (MW)
1	0,740	6,319	2,882	0,877	0,591	11,409
2	0	0	0	1,660	0,387	2,048
3	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	
Total						13,456

Gambar 4.8 Kerugian saluran daya aktif 4 bus hasil PFT

4.1.1.4 Hasil PFT daya reaktif sistem sederhana 4 bus

**TAQ
Kirim**

bus\saluran	1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
1	7,239	135,178	52,205	1,608	11,203
2	0	0	0	119,934	36,682
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0

Gambar 4.9 Daya reaktif kontribusi sisi kirim 4 bus

**TAQ
Terima**

bus\saluran	1_2	1_3	1_4	2_4	3_4
1	-1,608	-62,031	-28,605	-1,313	-8,883
2	0	0	0	-97,966	-29,086
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0

Gambar 4.10 Daya reaktif kontribusi sisi terima 4 bus

Loss AQ

bus\saluran	1_2	1_3	1_4	2_4	3_4	Total (MVAR)
1	5,631	73,147	23,600	0,294	2,320	104,992
2	0	0	0	21,967	7,596	29,563
3	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	
Total						134,555

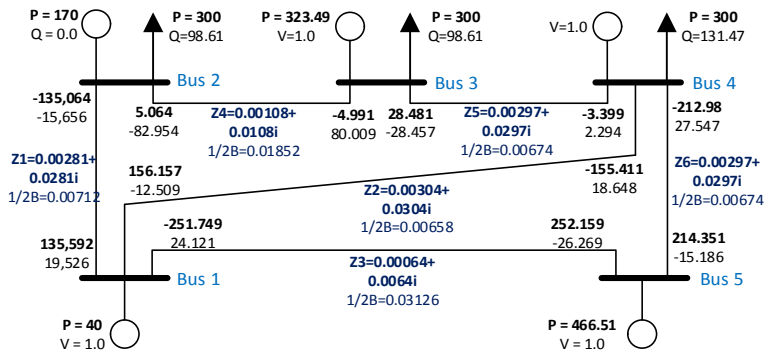
Gambar 4.11 Kerugian saluran daya reaktif 4 bus hasil PFT

Tampak bahwa hasil *power flow tracing* menghasilkan total daya aktif dan daya reaktif yang sama besar dengan hasil perhitungan aliran

daya. Oleh karena itu, metode *power flow tracing* sesuai untuk pendekatan perhitungan sistem kelistrikan dengan karakteristik aliran daya aktif dan daya reaktif mengalir ke arah yang sama.

4.1.2 Kasus B: Sistem Kelistrikan IEEE 5 Bus

Sistem kelistrikan IEEE 5 bus memiliki karakteristik aliran daya aktif dan reaktif mengalir ke arah yang berbeda kecuali saluran 1 (Z1), seperti pada gambar 4.8.



Gambar 4.12 Sistem kelistrikan IEEE 5 Bus

4.1.2.1 Hasil perhitungan aliran daya

Tabel 4.2 Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 5 Bus

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method

Maximum Power Mismatch = 8.87734e-13

No. of Iterations = 4

Bus No.	Voltage		Load		Generation		Injected
	Mag.	Angle Degree	MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.000	2.742	0.000	0.000	40.000	31.138	0.000
2	0.991	0.572	300.000	98.610	170.000	0.000	0.000
3	1.000	0.489	300.000	98.610	323.490	175.220	0.000
4	1.000	0.000	400.000	131.470	3.152	179.960	0.000
5	1.000	3.675	0.000	0.000	466.510	-41.456	0.000
Total			1.000.000	328.69	0 1003.15	344.862	0.000
Total Loss					3.152	16.172	

4.1.2.2 Hasil PFT sistem IEEE 5 bus

bus\saluran	1_2	1_4	1_5	2_3	3_4	4_5
AP 1	0,1371	0,1371	-0,8629	0	0	0
2	-1	0	0	α	0	0
3	0	0	0	-0,1752	0,8248	0
4	0	-0,3916	0	0	-0,0717	-0,5367
5	0	0	1	0	0	1

Gambar 4.13 Matriks faktor kontribusi daya aktif 5 bus sebelum PFT

bus\saluran	1_2	1_4	1_5	2_3	3_4	4_5
AQ 1	0,7134	-0,2866	0,7134	0	0	0
2	-0,1588	0	0	-0,8412	0	0
3	0	0	0	0,9575	-0,0425	0
4	0	1	0	0	1	1
5	0	0	-0,6337	0	0	-0,3663

Gambar 4.14 Matriks faktor kontribusi daya reaktif 5 bus sebelum PFT

bus\saluran	1_2	1_4	1_5	2_3	3_4	4_5
AP 1	0,1371	0,1371	0	0,137	0,024	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0,8629	0,8629	1	0,8629	0,1512	1
Total	1	1	1	1	1	1

Gambar 4.15 Matriks faktor kontribusi daya aktif 5 bus setelah PFT

bus\saluran	1_2	1_4	1_5	2_3	3_4	4_5
AQ 1	1	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0
4	0	1	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0
Total	1	1	1	1	1	1

Gambar 4.16 Matriks faktor kontribusi daya reaktif 5 bus setelah PFT

4.1.2.3 Hasil PFT daya aktif sistem IEEE 5 bus

bus\saluran	1_2	1_4	1_5	2_3	3_4	4_5
1	18,590	21,410	0	0,694	0,684	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	23,490	0
4	0	0	0	0	0	0
5	117,0018	134,747	252,1591	4,369603	4,306921	214,350875

Gambar 4.17 Daya aktif kontribusi sisi kirim 5 bus

bus\saluran	1_2	1_4	1_5	2_3	3_4	4_5
1	-18,518	-21,308	0	-0,684	-0,684	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	-23	0
4	0	0	0	0	0	0
5	-116,546	-134,104	-251,749	-4,30692	-4,30324	-212,98001

Gambar 4.18 Daya aktif kontribusi sisi terima 5 bus

bus\saluran	1_2	1_4	1_5	2_3	3_4	4_5	Total (MW)
1	0,072	0,102	0	0,010	0,001	0	0,185
2	0	0	0	0	0	0	0,000
3	0	0	0	0	0,020	0	0,020
4	0	0	0	0	0	0	0,000
5	0,456	0,643	0,410	0,063	0,004	1,371	2,947
Total							3,152

Gambar 4.19 Kerugian saluran daya aktif 5 bus hasil PFT

4.1.2.4 Hasil PFT daya reaktif sistem IEEE 5 bus

bus\salur:	1_2	1_4	1_5	2_3	3_4	4_5
1	13,930	0	17,208	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	76,610	0	0
4	5,596	18,648	6,913	3,399	2,294	27,547
5	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.20 Daya reaktif kontribusi sisi kirim 5 bus

bus\salur:	1_2	1_4	1_5	2_3	3_4	4_5
1	-11,169	0	-18,741	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	-79,430	0	0
4	-4,487	-12,509	-7,528	-3,524	-3,399	-15,186
5	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.21 Daya reaktif kontribusi sisi terima 5 bus

bus\saluran		1_2	1_4	1_5	2_3	3_4	4_5	
Loss AQ	1	2,761	0	-1,533	0	0	0	1,228
	2	0	0	0	0	0	0	0,000
	3	0	0	0	-2,820	0	0	-2,820
	4	1,109	6,140	-0,616	-0,125	-1,105	12,361	17,764
	5	0	0	0	0	0	0	0,000
Total								16,172

Gambar 4.22 Kerugian saluran daya reaktif 5 bus hasil PFT

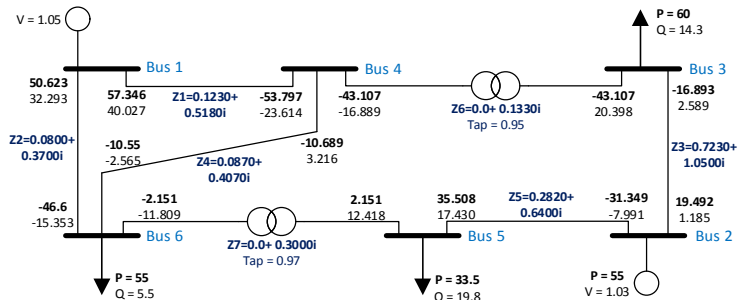
Tampak bahwa hasil *power flow tracing* pada sistem kelistrikan IEEE 5 Bus yang memiliki karakteristik arah aliran daya aktif dan reaktif yang berbeda menghasilkan total daya aktif dan daya reaktif yang sama besar dengan hasil perhitungan aliran daya. Oleh karena itu, metode *power flow tracing* sesuai untuk pendekatan perhitungan sistem kelistrikan dengan karakteristik aliran daya aktif dan daya reaktif mengalir dengan arah yang berbeda.

4.1.3 Kasus C: Sistem Kelistrikan IEEE 6 Bus

Sistem kelistrikan IEEE 6 bus memiliki karakteristik aliran daya reaktif mengalir dari kedua bus ke saluran pada saluran Z3 antara bus 2 dan bus 3. Fenomena ini menyebabkan seolah-olah terdapat *sink* pada saluran, seperti pada gambar 4.19. sehingga solusi pendekatan PTF adalah membuat node tambahan sebagai *sink node* pada matriks kontribusi (AP dan AQ), sehingga ukuran matriks kontribusi AP dan AQ lebih besar dibandingkan matriks aliran daya. Oleh karena itu, pada akhir proses *tracing* akan dilakukan eliminasi elemen matriks tambahan tersebut, sehingga matriks factor kontribusi akhir memiliki ukuran yang sama dengan matriks aliran daya. Untuk matriks kontribusi AP eliminasi bisa saja dilakukan secara langsung karena tidak mempengaruhi perhitungan faktor kontribusi lainnya. Hal tersebut dikarenakan pada bus tambahan tidak terjadi injeksi/ekstraksi daya. Sedangkan, permasalahan muncul saat eliminasi matriks faktor AQ, matriks AQ harus dieliminasi menggunakan persamaan:

$$k = k_{il} - k_{ij} \cdot k_n \quad (4.1)$$

Namun, karena pada tugas akhir ini hanya *tracing* daya kontribusi generator sehingga persamaan diatas tidak berlaku.



Gambar 4.23 Sistem kelistrikan IEEE 6 Bus

4.1.3.1 Hasil perhitungan aliran daya

Tabel 4.3 Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 6 Bus

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method

Maximum Power Mismatch = $1.77636e-15$

No. of Iterations = 6

Bus No.	Voltage		Load		Generation		Injected
	Mag.	Angle Degree	MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.050	0.000	0.000	0.000	107.968	72.321	0.000
2	1.030	-2.951	0.000	0.000	55.000	18.615	0.000
3	0.901	-15.144	60.000	14.300	0.000	0.000	0.000
4	0.882	-11.216	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.842	-14.796	33.500	19.800	0.000	0.000	0.000
6	0.858	-14.299	55.000	5.500	0.000	0.000	0.000
Total			148.500	39.600	162.968	90.936	0.000
Total Loss					14.468	51.336	

4.1.3.2 Hasil PFT sistem IEEE 6 bus

bus\saluran		1_4	1_6	2_3	4_6	5_2	4_3	6_5
AP	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	1	0	1	0	0
	3	0	0	-0,2815	0	0	-0,7185	0
	4	-1	0	0	α	0	α	0
	5	0	0	0	0	-0,9358	0	-0,0642
	6	0	-0,8154	0	-0,1846	0	0	α

Gambar 4.24 Matriks faktor kontribusi daya aktif 6 bus sebelum PFT

AQ	bus\saluran	1_4	1_6	2_3	4_6	5_2	4_3	6_5
	1	1	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	1	0	1	0	0
	3	0	0	α	0	0	-1	0
	4	-1	0	0	α	0	α	0
	5	0	0	0	0	-0,4036	0	-0,5964
	6	0	-0,85687	0	-0,14313	0	0	α
	Total	1	1	1	1	1	1	1

Gambar 4.25 Matriks faktor kontribusi daya reaktif 6 bus sebelum PFT

AP	bus\saluran	1_4	1_6	2_3	4_6	5_2	4_3	6_5
	1	1	1	0	1	0	1	1
	2	0	0	1	0	1	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0
	Total	1	1	1	1	1	1	1

Gambar 4.26 Matriks faktor kontribusi daya aktif 6 bus setelah PFT

AQ	bus\saluran	1_4	1_6	2_3	4_6	5_2	4_3	6_5
	1	1	1	1	1	0	1	1
	2	0	0	0	0	1	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0
	Total	1	1	1	1	1	1	1

Gambar 4.27 Matriks faktor kontribusi daya reaktif 6 bus setelah PFT

4.1.3.3 Hasil PFT daya aktif sistem IEEE 6 Bus

TAP Kirim	bus\saluran	1_4	1_6	2_3	4_6	5_2	4_3	6_5
	1	57,346	50,623	0	10,690	0	43,107	2,151
	2	0	0	19,492	0	35,508	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0
	Total	57,346	50,623	19,492	10,690	35,508	43,107	2,151

Gambar 4.28 Daya aktif kontribusi sisi kirim 6 bus

bus\saluran	1_4	1_6	2_3	4_6	5_2	4_3	6_5
1	-53,797	-46,600	0	-10,550	0,000	-43,107112	-2,1506737
2	0	0	-16,893	0	-31,349	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.29 Daya aktif kontribusi sisi terima 6 bus

bus\saluran	1_2	1_4	1_5	2_3	3_4	4_5	6_5	Total (MW)
1	3,549	4,022	0	0,139	0	0	0	7,711
2	0	0	2,599	0	4,159	0	0	6,758
3	0	0	0	0	0	0	0	0,000
4	0	0	0	0	0	0	0	0,000
5	0	0	0	0	0	0	0	0,000
6	0	0	0	0	0	0	0	0,000
Total								14,468

Gambar 4.30 Kerugian saluran daya aktif 6 bus hasil PFT

4.1.3.4 Hasil PFT daya reaktif sistem IEEE 6 Bus

bus\saluran	1_4	1_6	2_3	4_6	5_2	4_3	6_5
1	40,0272	32,2934	2,5892	3	0	20,3975	12,4178
2	0	0	1	0	17,4303	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.31 Daya reaktif kontribusi sisi kirim 6 bus

bus\saluran	1_4	1_6	2_3	4_6	5_2	4_3	6_5
1	-23,6139	-15,3532	0	-3	0	-16,8892	-11,8087
2	0	0	0	0	-7,9913	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.32 Daya reaktif kontribusi sisi terima 6 bus

bus\saluran	1_4	1_6	2_3	4_6	5_2	4_3	6_5	Total (MVAR)
1	16,413	16,940	2,589	0,652	0,000	3,508	0,609	40,712
2	0	0	1,185	0,000	9,439	0	0	10,624
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
Total								51,336

Gambar 4.33 Kerugian saluran daya reaktif 6 bus hasil PFT

Tampak bahwa hasil *power flow tracing* pada sistem kelistrikan IEEE 6 bus yang memiliki karakteristik arah aliran daya reaktif mengalir dari kedua bus ke saluran pada saluran Z3 antara bus 2 dan bus 3, tetap diperoleh total daya aktif dan daya reaktif yang sama besar dengan hasil perhitungan aliran daya. Oleh karena itu, metode *power flow tracing* sesuai untuk pendekatan perhitungan sistem kelistrikan dengan karakteristik arah aliran daya reaktif mengalir dari kedua bus ke saluran.

4.2 Reduksi Jaringan Menggunakan Konsep Kerugian Saluran

Untuk mengubah sistem multimesin menjadi model SMIB, dibutuhkan perhitungan impedansi ekuivalen generator yang diamati. Namun, pada referensi [5] memiliki kelemahan yaitu sistem dimodelkan superposisi sehingga tidak merepresentasikan keadaan semula saat multimesin, beban dinormalisasi secara seragam untuk mengatasi *overload* pada generator yang diamati, terkadang hasil aliran daya superposisi tidak konvergen akibat terlalu besarnya impedansi saluran, dan memerlukan banyak penyesuaian sistem superposisi agar sesuai dengan titik operasi keadaan awal.

Tabel 4.4 Perbandingan Metode Reduksi Jaringan

	Jawa Timur		Jawa Tengah	
	Superposisi	Power Flow Tracing	Superposisi	Power Flow Tracing
Konvergensi	√	√	-	√
Titik Operasi (MVA)	150.012 - 17.518i	150 - 17.542i	-	282.980 + 56.642i
Kerugian Saluran (MVA)	0.622 + 2.834i	0.0175 - 0.0750i	-	10.0518 + 49.5689i
Nilai Impedansi Ekuivalen (p.u.)	0.0284 + 0.1293i	0.0008 - 0.0033i	-	0.0116 + 0.0572i

Berdasarkan tabel 4.4 metode reduksi jaringan menggunakan referensi [5] tidak konvergen pada sistem transmisi 150kV Jawa Tengah. Selain itu tampak jika menggunakan metode superposisi terjadi pergeseran titik operasi generator akibat adanya penyesuaian pada proses perhitungan aliran daya superposisi.

Lebih jauh lagi, terjadi penyimpangan yang signifikan antara kerugian saluran superposisi dengan *power flow tracing* hal ini disebabkan metode superposisi mempertahankan struktur jaringan seluruh sistem. Sedangkan *power flow tracing* menggunakan kondisi multimesin untuk mencari kontribusi daya, sehingga daya yang dikontribusikan sebuah generator mungkin tidak menyumbang keseluruhan beban.

Kondisi multimesin menggambarkan kontribusi daya generator mungkin hanya pada beban lokal atau sebagian beban sistem, hal ini ditunjukkan pada gambar 4.11 untuk sistem IEEE 5 Bus. Tampak pada matriks kontribusi daya aktif (AP) hasil PFT yang berkontribusi menyumbang daya ke sistem hanya pada bus 1, 3, dan 5. Padahal pada setiap bus terdapat generator. Namun, generator pada bus 2 dan 4 tidak berkontribusi menyumbang daya ke sistem. Hal ini disebabkan daya yang dibangkitkan generator lebih kecil dibandingkan beban pada bus tersebut. sehingga daya yang dibangkitkan generator hanya menyumbang daya beban local, tidak ke sistem.

Metode *power flow tracing* menjamin konvergensi selama perhitungan aliran daya konvergen. Lebih jauh lagi, menggunakan *power flow tracing* mampu mempertahankan titik operasi generator tanpa adanya penyesuaian karena, masukan metode *power flow tracing* mempertahankan kondisi multimesin. Oleh karena itu, pendekatan mencari kontribusi kerugian saluran jaringan menggunakan metode *power flow tracing* merupakan pendekatan yang masuk akal walaupun dianalisis berdasarkan perhitungan aliran daya multimesin kondisi awal tanpa *power flow tracing*.

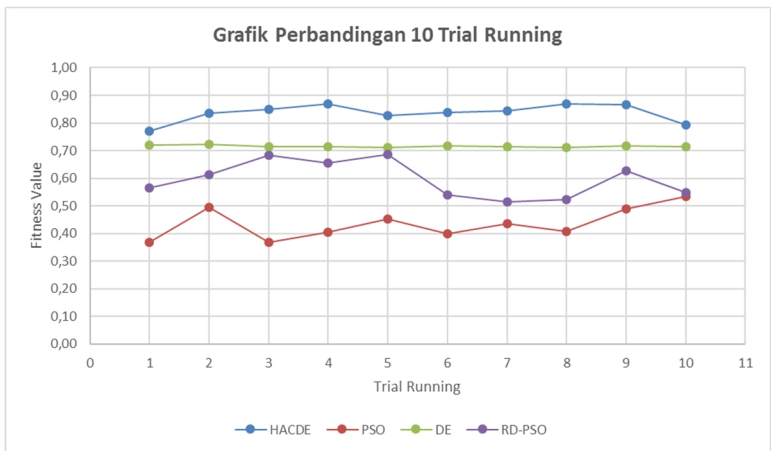
4.3 Optimasi Parameter PSS

Tujuan akhir pada tugas akhir ini berupa nilai parameter PSS yang optimal. Untuk mendapatkan nilai parameter PSS yang optimal diperlukan bantuan metode optimasi dikarenakan banyaknya kombinasi yang diperlukan. Selain itu untuk domain kontinu, dengan ketelitian 4 angka dibelakang tanda koma, telah menjadi kombinasi yang sangat banyak untuk 6 parameter PSS. Namun, metode optimasi yang konvensional memiliki performa belum cukup memuaskan untuk mendapatkan nilai optimal. Oleh karena itu pada tugas akhir ini ditawarkan sebuah metode optimasi yang memiliki performa lebih baik dibandingkan metode optimasi konvensional, bernama *Hybrid Adaptive Chaotic Differential Evolution* (HACDE). Performa metode HACDE akan dibandingkan metode lain seperti, PSO, DE, dan RD PSO, guna menunjukkan kelebihan HACDE untuk mendapatkan nilai konvergensi yang lebih baik.

4.3.1 Uji Performa HACDE

4.3.1.1 Uji performa berdasarkan eigenvalue

Untuk menunjukkan peningkatan performa HACDE ditunjukkan seperti yang ditampilkan pada gambar 4.30, masing-masing metode optimasi disimulasikan sebanyak 10 secara berturut-turut. Hal ini bertujuan untuk menunjukkan konsistensi metode optimasi untuk mendapatkan nilai optimal. Secara lebih detail nilai konvergensi masing masing metode optimasi ditunjukkan pada tabel 4.5 hingga tabel 4.9.



Gambar 4.34 Grafik perbandingan konvergensi metode optimasi

Tabel 4.5 Hasil 10 kali *Trial Running* HACDE dan DE

HACDE			DE		
trial running	fitness value	waktu	trial running	fitness value	waktu
1	0,77045	3138,4489	1	0,720632	3160,1857
2	0,83666	3049,8461	2	0,721814	3319,6651
3	0,84968	3016,1255	3	0,714415	3296,1643
4	0,86940	3080,7694	4	0,713850	3281,3883
5	0,82778	3039,7414	5	0,712429	3286,9618
6	0,83840	3051,5497	6	0,716481	3280,7217
7	0,84302	3082,3699	7	0,714399	3288,4373
8	0,86934	3078,3758	8	0,712039	3284,4566
9	0,86542	2963,5401	9	0,718200	3321,4587
10	0,79348	3006,5227	10	0,715099	3323,4911
MEAN	0,836362078	3050,7289	MEAN	0,715935897	3284,293
STD	0,032499773	48,577985	STD	0,003320765	46,85442
MAX	0,8694007	3138,4489	MAX	0,72181444	3323,491

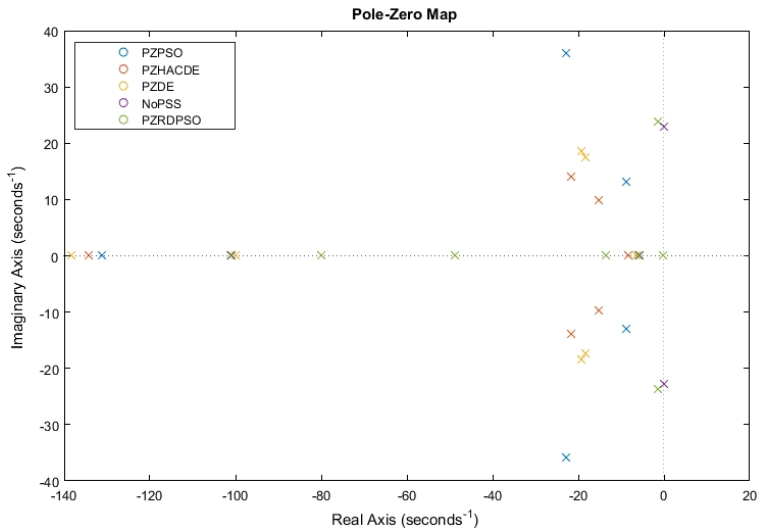
Tabel 4.6 Hasil 10 kali *Trial Running* RDPSO dan PSO

RD-PSO			PSO		
trial running	fitness value	waktu	trial running	fitness value	waktu
1	0,565055	1609,1934	1	0,367271	1593,4385
2	0,613782	1713,4492	2	0,495521	1640,7736
3	0,684159	1693,8300	3	0,367483	1626,8093
4	0,656028	1695,4679	4	0,404422	1640,6187
5	0,685768	3638,7010	5	0,453919	1637,9748
6	0,541021	1742,6532	6	0,399979	1640,2996
7	0,513425	1707,4948	7	0,434485	1638,2551
8	0,523201	1716,6475	8	0,406439	1179,1091
9	0,625986	1708,4806	9	0,488621	1645,7929
10	0,547202	1700,4075	10	0,534427	1646,3909
MEAN	0,595562774	1892,632507	MEAN	0,435256697	1588,9462
STD	0,06593531	614,4734561	STD	0,056670863	144,82946
MAX	0,68576832	3638,700973	MAX	0,534427	1646,3909

Berdasarkan tabel 4.5 dan 4.6 terdapat 2 parameter evaluasi, yaitu rata-rata (*mean*) dan standar deviasi. Parameter rata-rata menunjukkan kecenderungan nilai optimal yang paling sering diperoleh, sehingga semakin tinggi nilai rata-rata, semakin baik, karena nilai optimal akan berkisar nilai rata-rata tersebut. sedangkan parameter standar deviasi menunjukkan konsistensi dan simpangan metode optimasi mendapatkan nilai rata-rata (*mean*), semakin kecil nilai standar deviasi semakin baik karena simpangan nilai optimal semakin sempit dan semakin konsisten metode optimasi mendapatkan nilai optimal, walaupun dicoba disimulasikan secara acak.

Tabel 4.7 Nilai Parameter PSS Hasil Metode Optimasi

	Kpss	Tw	T1	T2	T3	T4
HACDE	5,7118	4,8632	0,0754	0,0102	0,9968	0,0101
DE	2,9978	4,7747	0,0974	0,0100	1,1752	0,0100
RDPSO	1,6695	4,8189	0,2002	0,0137	0,8535	0,0143
PSO	6,1732	4,7316	0,1700	0,0120	0,5958	0,0111



Gambar 4.35 Letak *pole-zero* eigenvalue hasil penalaan PSS

Berdasarkan *plotting* eigenvalue hasil optimasi penalaan PSS, tampak bahwa *damping ratio* terbesar diberikan oleh PSS yang ditala oleh HACDE.

4.3.1.2 Uji performa berdasarkan domain waktu

Peningkatan performa HACDE tidak hanya berdasarkan eigenvalue, tetapi juga perlu diuji pada domain waktu. Parameter evaluasi domain waktu yang digunakan adalah *Integral Time Absolute Error* (ITAE), seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Performa Domain Waktu Menggunakan ITAE

	Tanpa PSS	HACDE	DE	RD-PSO	PSO
ITAE	529,8	12,89	16,02	21,21	14,78

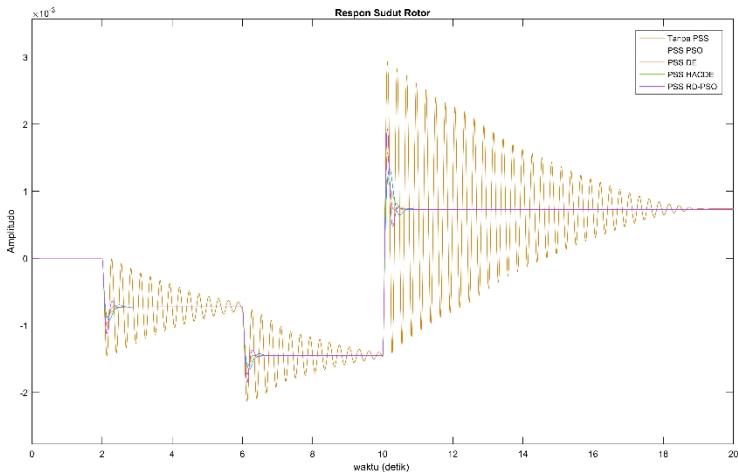
*semua nilai ITAE pada orde 10^{-4}

Semakin besar nilai ITAE semakin besar simpangan dengan nilai referensi keadaan *steady state*. Berdasarkan tabel 4.8 diatas HACDE memiliki redaman yang jauh lebih bagus dibandingkan dengan metode optimasi lain.

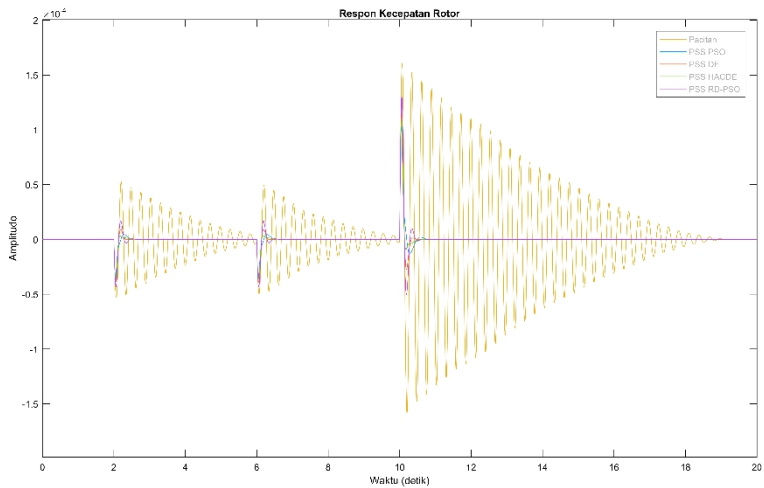
4.3.2 Simulasi Domain Waktu

Simulasi domain waktu digunakan untuk melihat respon beberapa parameter generator, seperti sudut rotor (δ), kecepatan rotor (ω), dan tegangan terminal (V_t). Simulasi dilakukan dengan bantuan program SIMULINK yang telah dimodelkan pada BAB 3. Tipe gangguan yang diujicobakan berupa:

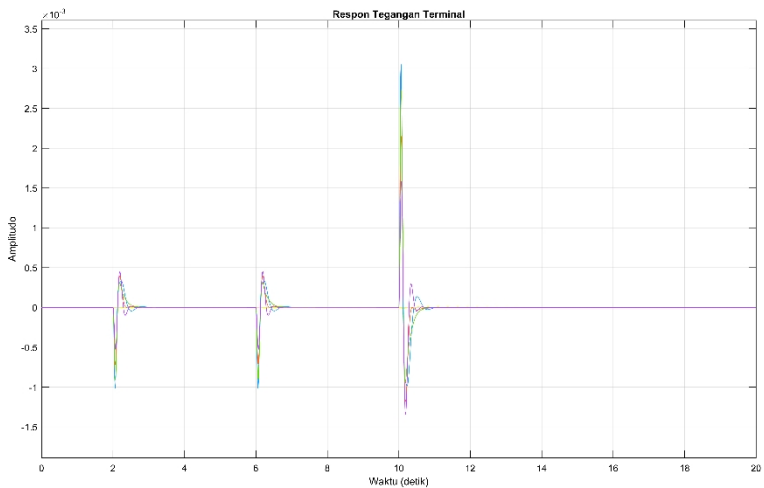
1. Penambahan beban 0.01 p.u pada detik ke-2
2. Penambahan beban 0.01 p.u pada detik ke-6
3. Pelepasan beban 0.03 p.u pada detik ke-10



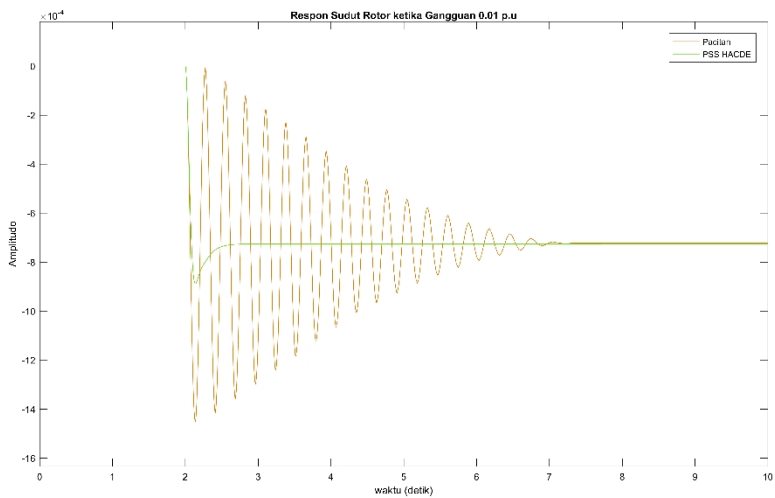
Gambar 4.36 Respon Sudut Rotor Generator Pacitan



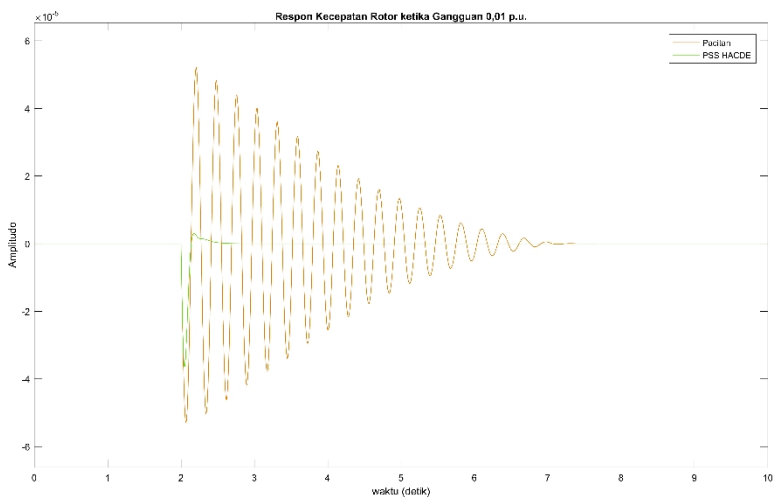
Gambar 4.37 Respon Kecepatan Rotor Generator Pacitan



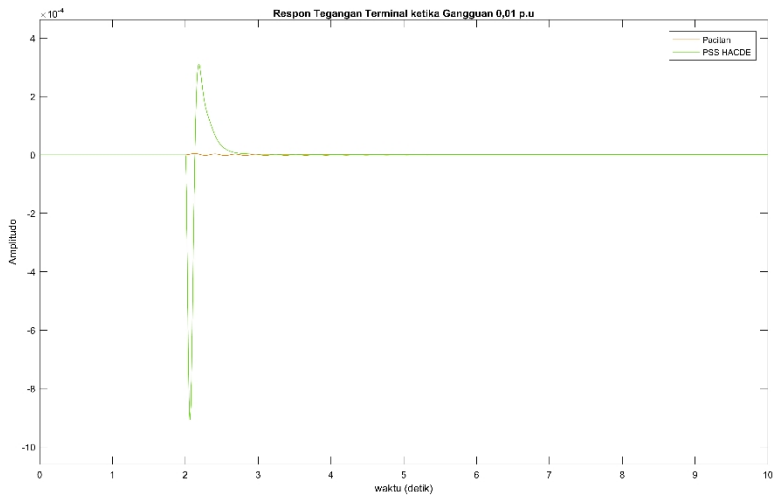
Gambar 4.38 Respon Tegangan Terminal Generator Pacitan



Gambar 4.39 Respon Sudut Rotor Generator Pacitan dengan gangguan 0,01 p.u ketika 1 detik



Gambar 4.40 Respon Kecepatan Rotor Generator Pacitan dengan Gangguan 0,01 p.u ketika 1 detik



Gambar 4.41 Respon Tegangan Terminal Generator Pacitan dengan Gangguan 0,01 p.u ketika 1 detik

Berdasarkan gambar 4.36 hingga gambar 4.41 tampak bahwa generator Pacitan dalam kondisi stabil dan respon redaman osilasi terbaik diberikan oleh PSS ditala HACDE.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisa, maka ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode reduksi jaringan berdasarkan konsep kerugian saluran menggunakan metode superposisi memiliki beberapa kelemahan, antara lain:
 - a. Tidak menjamin konvergensi karena impedansi saluran lebih besar dibandingkan kapasitas pembangkit.
 - b. Perlunya banyak penyesuaian parameter agar aliran daya superposisi tidak *overload*.
 - c. Tidak merepresentasikan kondisi multimesin.
 - d. Tidak merepresentasikan titik operasi generator saat multimesin.
2. Metode *Power Flow Tracing* mampu mengatasi kelemahan metode superposisi antara lain:
 - a. Menjamin konvergensi selama perhitungan aliran daya konvergen.
 - b. Tanpa adanya penyesuaian parameter perhitungan aliran daya karena mempertahankan kondisi multimesin.
 - c. Mempertahankan kondisi multimesin awal.
 - d. Merepresentasikan titik operasi karena mempertahankan keadaan multimesin.
3. Berdasarkan fungsi objektif eigenvalue, metode HACDE memiliki performa mendapatkan nilai optimal yang jauh lebih baik dibandingkan metode RD-PSO, PSO, dan DE. Nilai optimal masing-masing metode diurutkan dari yang terbaik, sebagai berikut:
 - a. HACDE 0,869
 - b. DE 0,722
 - c. RDPSO 0,686
 - d. PSO 0,534
4. Berdasarkan evaluasi domain waktu menggunakan ITAE didapatkan hasil yang hampir sama dengan urutan menggunakan fungsi objektif, yaitu HACDE memiliki nilai yang jauh lebih kecil dibandingkan metode optimasi RD-PSO, PSO, dan PSO, sebagai berikut:

- | | | |
|----|--------|-------|
| a. | HACDE | 12,89 |
| b. | PSO | 14,78 |
| c. | DE | 16,02 |
| d. | RD-PSO | 21,21 |
5. Penambahan PSS yang telah ditala pada Generator Pacitan mampu memberikan redaman pada osilasi. Lebih jauh lagi, PSS yang ditala dengan menggunakan HACDE memberikan redaman yang paling optimal dibandingkan PSS yang ditala RD-PSO, DE, dan PSO.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir kedepan adalah sebagai berikut:

1. Perlunya pengembangan *Power Flow Tracing* yang juga mempertimbangkan hubungan daya aktif dan reaktif tanpa terpisah (secara simultan).
2. Perlunya validasi/pembandingan lebih jauh pada impedansi ekuivalen, seperti metode Rei-Dimo.
3. Perlunya pemilihan fungsi objektif yang sesuai dengan sistem, lebih baik menggunakan fungsi objektif domain waktu seperti ITAE, tetapi memiliki kekurangan simulasi yang lama.

DAFTAR PUSTAKA

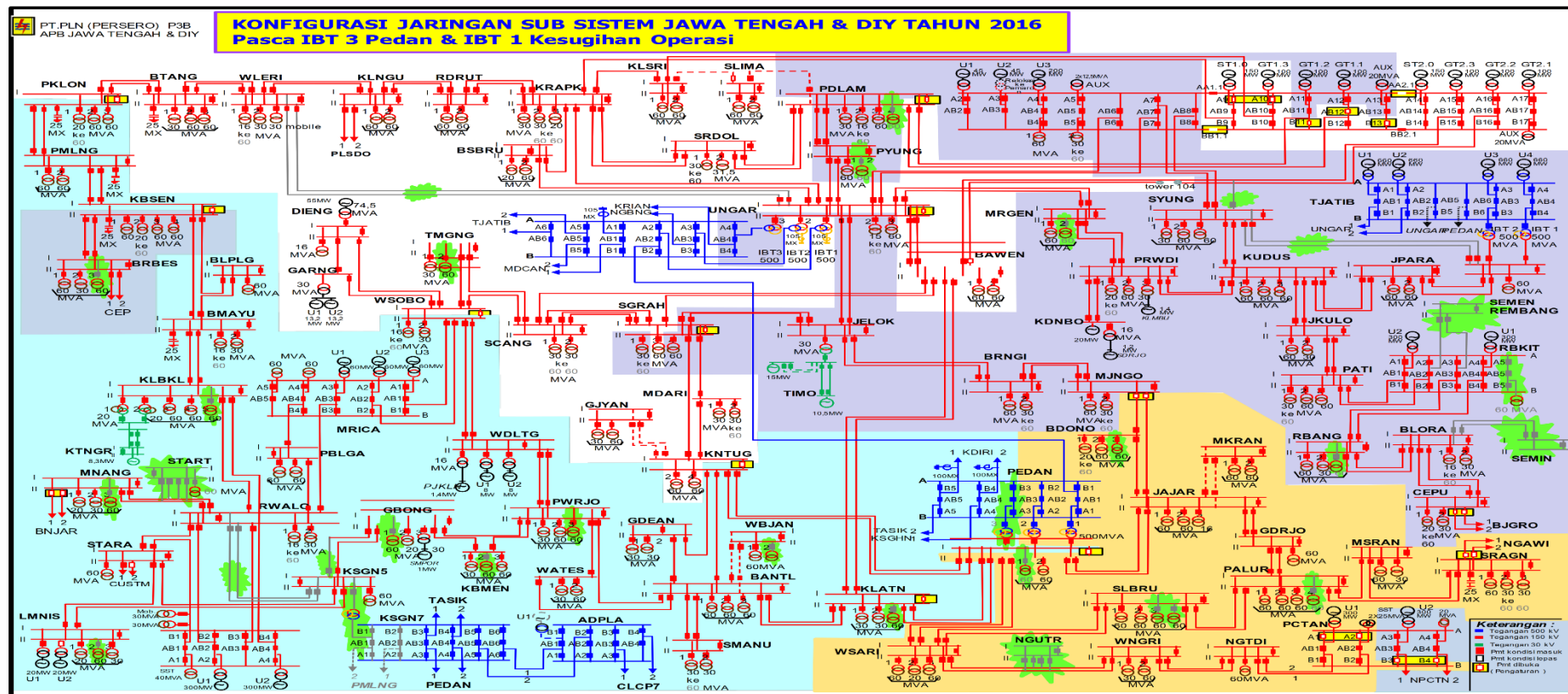
- [1] Sofia, M., “PLTU Pacitan Gangguan, Listrik di Jakarta dan Tangerang Padam” <URL: <http://metro.news.viva.co.id/news/read/503832-pltu-pacitan-gangguan-listrik-di-jakarta-dan-tangerang-padam>>, 12 Mei 2014.
- [2] P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [3] P.M. Anderson and A.A. Fouad, Power System Control and Stability, Ames: Iowa State University Press, 1977.
- [4] M.J. Gibbard, P. Pourbeik and D.J. Vowles, Small-Signal Stability, Control, and Dynamic Performance of Power Systems, University of Adelaide Press, Adelaide, 2015.
- [5] Rusilawati, Soeprijanto, A., Penangsang, O., dan Uman, DF., “Determination of generator steady state stability limit using losses concept and RBFNN”, Jurnal Teknologi, UTM Press, Johor Bahru, 2015.
- [6] A. Soeprijanto, O. Fenno, D. Ashari, D.F. Uman, Suyanto, Rusilawati., “Optimal Tuning of PSS Parameter for Damping Improvement in SMIB Model Using Random Drift PSO and Network Reduction with Losses Concept”, ISITIA, Lombok, 2016.
- [7] A Soeprijanto, Desain KONTROLLER untuk Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik. Surabaya: ITS Press, 2012.
- [8] J. Sun, V. Palade, X. J. Wu, W. Fang, Z. Wang, “Solving The Power Economic Dispatch Problem with Generator Constraints by Random Drift Particle Swarm Optimization”, IEEE Trans. Ind. Inf., vol.10, pp. 222-232, 2014.
- [9] Z. Guo, H. Huang, C. Deng, X. Yue, Z. Wu, “An Enhanced Differential Evolution with Elite Chaotic Local Search”, Hindawi Computational Intell. Neurosci., 2015.
- [10] Heffron, W.G., Phillips, R.A., “Effect of a Modern Amplidyne Voltage Regulator on Underexcited Operation of Large Turbine Generators”, AIEE, 1952.
- [11] Demello, F.P., Concordia, C., “Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control”, IEEE Trans. On Power App. And System, 88(4):316-329, 1969.

- [12] Imam Robandi, "*Desain Sistem Tenaga Modern*", Yogyakarta: ANDI press, 2006.
- [13] J. B. Ward, "Equivalent Circuit for Power Flow Studies", AIEE Trans. Power App. Syst., vol.68, pp. 373-382, 1949.
- [14] P. Domo, Nodal Analysis of Power System, Abacus Press, Kent, England, 1975.
- [15] K.L. Lo, L.J. Peng, J.F. Macqueen, A.O. Ekwue, D.T.Y. Cheng, "An Extended Ward Equivalent Approach for Power System Security Assessment", Elsevier Electric Power System Research, vol.42:181-188, 1997.
- [16] T.E.D. Liacco, S.C. Savulescu, K.A. Ramarao, "An On-Line Topological Equivalent of a Power System", IEEE Trans. Power App. Syst., vol.97, pp. 1550-1563, 1978.
- [17] S.C. Savulescu, "Equivalents for Security Analysis of Power Systems", IEEE Trans. Power App. Syst., vol.100, pp. 2672-2682, 1981.
- [18] M. L. Oatts, S. R. Erwin, J.L. Hart, "Application of The REI Equivalent for Operations Planning Analysis of Interchange Schedules", IEEE Trans. Power Syst., vol.5, pp. 547-555, 1990.
- [19] J. Bialek, "Topological Generation and Load Distribution factors for Supplement Charge Allocation in Transmission Open Access", IEEE Trans. Power Syst. vol.12, pp. 1185-1193, 1997.
- [20] D. Kirschen, R. Allan, G. Strbac, "Contribution of Individual Generators to Loads and Flows", IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, pp. 52-60. 1997.
- [21] F. Fu, Y. Ni, P. Wei, "Power Transfer Allocation for Open Access using Graph Theory – Fundamentals and Applications in Power Systems without loopflow", IEEE Trans. Power Syst., vol.15, pp. 923-929, 2000.
- [22] P. Wei, B. Yuan, Y. Ni, F. Fu, "Power Flow for Transmission Open Access", Int. Conf. Electric Utility Deregulation and Power Technologies, City University, London, 2000.
- [23] S. Abdelkader, "Efficient Computation Algorithm for Calculating Contribution to Line Flows and Losses", IEE Proc. Gene. Trans. Distrib., vol.153, pp. 391-398, 2006.
- [24] Simon, D., "Evolutionary Optimization Algorithms", Wiley, New Jersey, 2013.

- [25] Abido, M.A., "Robust Design of Power System Stabilizers for Multimachine Power Systems Using Differential Evolution", *Comp. Int. In Pow. Eng.*, Springer, Berlin, SCI 302, pp.1-18, 2010.
- [26] Z. Guo, H. Huang, C. Deng, X. Yue, Z. Wu, "An Enhanced Differential Evolution with Elite Chaotic Local Search", *Hindawi Computational Intell. Neurosci.*, 2015.
- [27] T. Kapitaniak, *Continuous Control and Synchronous in chaotic system, Chaos, Solitons, and Fractals*, pp. 237-244. 1995.
- [28] D. Jia, G. Zheng, M.K. Khan, "An Effective Memetic Differential Evolution Algorithm based on Chaotic Local Search", *Elsevier Information Science*, vol. 181, pp. 3175-3187, 2011.
- [29] J. Brest, S. Greiner, B. Boskovic, M. Mernik, V. Zumer, "Self-Adapting Control Parameters in Differential Evolution: a Comparative Study on Numerical Benchmark Problems", *IEEE Trans. Evol. Comp.*, vol. 10, pp. 646-657, 2006.
- [30] A. K. Qin, V.L. Huang, P.N. Suganthan, "Differential Evolution Algorithm with Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization", *IEEE Trans. Evol. Comp.*, vol. 13, pp. 398-417, 2011.
- [31] J. Zhang and A. C. Sanderson, "JADE: Adaptive Differential Evolution with Optional External Archive", *IEEE Trans. Evol. Comp.*, vol.13, pp. 945-958, 2009.
- [32] Y. Lu, J. Zhou, H. Qin, Y. Wang, Y. Zhang, "An Adaptive Chaotic Differential Evolution for The Short-Term Hydrothermal Generation Scheduling Problem", *Elsevier Energy Conversion and Manag.*, vol.51, pp. 1481-1490. 2010.
- [33] Y. Tan, G. Tan, X. Wu, "Hybrid Real-Code Genetic Algorithm with Chaotic Local Search for Global Optimization", *Journal of Information and Comp. Science*, vol. 8, pp. 3171-3179. 2011.
- [34] N. N. Islam, M. A. Hannan, H. Shareef, A. Mohamed, M. A. Salam, "Comparative Study of Popular Objective Function for Damping Power System Oscillations in Multimachine System", *Hindawi publishing Corp.*, vol. 2014. 2014.
- [35] M. A. Abido and Y. L. Abdel-Magid, "A Genetic-Based Power System Stabilizer", *Electric Machines and Power System*, vol. 26:6, pp. 559-571. 1998.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN 1 DATA ALIRAN DAYA SISTEM TRANSMISI 150kV JAWA TENGAH



Tabel 1 Bus Data

Bus No.	Bus Code	Voltage Magnitude	Angle Degree	LOAD		Generation				Static MVAR	Nama
				MW	MVAR	MW	MVAR	Qmin	Qmax	+QC/-QL	
1	2	1.01	0.0	20	3	282.98	53.85	0.0	0.0	0	%PLTU Pacitan
2	2	1.07	0.0	0	0	568	172	0.0	0.0	0	%PLTU Cilacap
3	0	1.00	0.0	8	2	0	0	0.0	0.0	0	%PLTA Wadaslintang
4	0	1.00	0.0	24	4	18	0	0.0	0.0	0	%PLTA Mrica
5	2	0.97	0.0	0	0	281	84	0.0	0.0	0	%PLTU Rembang KIT
6	0	1.00	0.0	0	0	20	2	0.0	0.0	0	%PLTA Kedung Ombo
7	0	1.00	0.0	0	0	25	4	0.0	0.0	0	%PLTA Garung
8	0	1.00	0.0	15	4	22	2	0.0	0.0	0	%PLTP Dieng
9	2	1.04	0.0	35	7	520	129	0.0	0.0	0	%PLTU Tambak Lorok
10	2	1.12	0.0	38	44	334	51	0.0	0.0	0	%PLTU Tanjung Jati
11	1	1.00	0.0	50	14	826.349	435.301	0.0	0.0	0	%UNGARAN (500kV)
12	2	1.00	0.0	49	18	694.157	253.45	0.0	0.0	0	%PEDAN (500kV)
13	0	1.00	0.0	20	7	0	0	0.0	0.0	0	%KESUGIHAN5 (500kV)
14	0	1.00	0.0	27	9	0	0	0.0	0.0	0	%LOMANIS (PLTG CLCAP out of service)
15	0	1.00	0.0	41	15	0	0	0.0	0.0	0	%GOMBONG (Pembangkit out of service)
16	0	1.00	0.0	70	30	0	0	0.0	0.0	0	%PURWODADI (Pembangkit out of service)
17	0	1.00	0.0	15	4	0	0	0.0	0.0	0	%NGUNTORONADI
18	0	1.00	0.0	44	15	0	0	0.0	0.0	0	%WONOGIRI (ada PLTA)
19	0	1.00	0.0	29	11	0	0	0.0	0.0	0	%WONOSARI
20	0	1.00	0.0	42	16	0	0	0.0	0.0	0	%SEMANU
21	0	1.00	0.0	21	14	0	0	0.0	0.0	%50	%SEMEN NUSANTARA
22	0	1.00	0.0	16	5	0	0	0.0	0.0	0	%RAWALO
23	0	1.00	0.0	14	5	0	0	0.0	0.0	0	%KEBUMEN
24	0	1.00	0.0	23	8	0	0	0.0	0.0	0	%WATES
25	0	1.00	0.0	45	13	0	0	0.0	0.0	0	%PURWOREJO

Tabel 1 Bus Data (lanjutan)

Bus No.	Bus Code	Voltage Magnitude	Angle Degree	LOAD		Generation				Static MVAR	Nama
				MW	MVAR	MW	MVAR	Qmin	Qmax	+QC/-QL	
26	0	1.00	0.0	23	11	0	0	0.0	0.0	0	%GODEAN
27	0	1.00	0.0	74	23	0	0	0.0	0.0	0	%BANTUL
28	0	1.00	0.0	28	11	0	0	0.0	0.0	0	%WIROBRAJAN
29	0	1.00	0.0	48	19	0	0	0.0	0.0	0	%KLATEN
30	0	1.00	0.0	57	17	0	0	0.0	0.0	0	%SOLOBARU
31	0	1.00	0.0	122	40	0	0	0.0	0.0	0	%PALUR
32	0	1.00	0.0	131	55	0	0	0.0	0.0	%25	%SRAGEN
33	0	1.00	0.0	73	24	0	0	0.0	0.0	0	%MASARAN
34	0	1.00	0.0	48	20	0	0	0.0	0.0	0	%GONDANGREJO
35	0	1.00	0.0	63	20	0	0	0.0	0.0	0	%JAJAR
36	0	1.00	0.0	79	22	0	0	0.0	0.0	0	%KENTUNGAN
37	0	1.00	0.0	33	10	0	0	0.0	0.0	0	%PURBALINGGA5
38	0	1.00	0.0	40	25	0	0	0.0	0.0	0	%MAJENANG
39	0	1.00	0.0	72	35	2.8	0	0.0	0.0	0	%KALIBAKAL (ada PLTA)
40	0	1.00	0.0	80	23	0	0	0.0	0.0	0	%GEJAYAN
41	0	1.00	0.0	38	10	0	0	0.0	0.0	0	%MEDARI
42	0	1.00	0.0	53	24	0	0	0.0	0.0	0	%BANYUDONO
43	0	1.00	0.0	60	23	0	0	0.0	0.0	0	%MANGKUNEGARAN
44	0	1.00	0.0	52	20	0	0	0.0	0.0	0	%REMBANG
45	0	1.00	0.0	33	14	0	0	0.0	0.0	%25	%BLORA
46	0	1.00	0.0	95	41	0	0	0.0	0.0	%25	%PATI
47	0	1.00	0.0	72	26	0	0	0.0	0.0	0	%MOJOSONGO
48	0	1.00	0.0	67	22	0	0	0.0	0.0	0	%BRINGIN
49	0	1.00	0.0	0	0	4.6	0.8	0.0	0.0	0	%JELOK (ada PLTA)
50	0	1.00	0.0	93	31	0	0	0.0	0.0	0	%SANGGRAHAN

Tabel 1 Bus Data (lanjutan)

Bus No.	Bus Code	Voltage Magnitude	Angle Degree	LOAD		Generation				Static MVAR	Nama
				MW	MVAR	MW	MVAR	Qmin	Qmax	+QC/-QL	
51	0	1.00	0.0	30	11	0	0	0.0	0.0	0	%SECANG DOUBLE
52	0	1.00	0.0	17	8	0	0	0.0	0.0	0	%WONOSOBO
53	0	1.00	0.0	22	7	0	0	0.0	0.0	%25	%BUMIAYU
54	0	1.00	0.0	65	21	0	0	0.0	0.0	%25	%BREBES
55	0	1.00	0.0	35	12	0	0	0.0	0.0	0	%BALAPULANG
56	0	1.00	0.0	24	10	0	0	0.0	0.0	0	%TEMANGGUNG(1)
57	0	1.00	0.0	51	18	0	0	0.0	0.0	0	%BAWEN
58	0	1.00	0.0	98	41	0	0	0.0	0.0	0	%KUDUS
59	0	1.00	0.0	44	20	0	0	0.0	0.0	0	%JEKULO5
60	0	1.00	0.0	49	20	0	0	0.0	0.0	0	%JEPARA
61	0	1.00	0.0	126	44	0	9	0.0	0.0	0	%SAYUNG
62	0	1.00	0.0	49	21	0	0	0.0	0.0	0	%MRANGGEN
63	0	1.00	0.0	103	44	0	0	0.0	0.0	25	%KEBASEN
64	0	1.00	0.0	76	15	0	0	0.0	0.0	%25	%PEMALANG
65	0	1.00	0.0	21	8	0	0	0.0	0.0	0	%BUMI SEMARANG BARU
66	0	1.00	0.0	34	13	0	0	0.0	0.0	0	%SRONDOL
67	0	1.00	0.0	23	9	0	77	0.0	0.0	0	%PUKAPAYUNG
68	0	1.00	0.0	81	28	0	0	0.0	0.0	0	%PANDEANLAMPER
69	0	1.00	0.0	60	25	0	0	0.0	0.0	0	%SIMPANGLIMA
70	0	1.00	0.0	59	19	0	0	0.0	0.0	0	%KALISARI
71	0	1.00	0.0	20	6	0	0	0.0	0.0	0	%KRAPYAK
72	0	1.00	0.0	36	12	0	0	0.0	0.0	0	%RANDUGARUT
73	0	1.00	0.0	37	14	0	0	0.0	0.0	0	%KALIWUNGU
74	0	1.00	0.0	43	11	0	4	0.0	0.0	0	%WLERI
75	0	1.00	0.0	54	18	0	0	0.0	0.0	25	%BATANG
76	0	1.00	0.0	92	29	0	0	0.0	0.0	25	%PEKALONGAN
77	0	1.00	0.0	27	10	0	0	0.0	0.0	0	%CEPU

Tabel 2 Data Saluran Transmisi

from bus	to bus	R	X	1/2 B	= 1 for lines	Nama
		p.u.	p.u.	p.u.	> 1 or < 1 for transf. Tap at bus sending	
1	17	0.0038528	0.0301803	0.0335699	1	%PLTU Pacitan - NGUNTORONADI
2	21	0.0040534	0.0121009	0.0041759	1	%PLTU Cilacap - SEMEN NUSANTARA
2	22	0.0018807	0.0136414	0.0197820	1	%PLTU Cilacap - RAWALO
2	39	0.0065119	0.0472325	0.0171235	1	%PLTU Cilacap - KALIBAKAL
3	25	0.0085174	0.0246571	0.0181291	1	%PLTA Wadaslintang - PURWOREJO
3	52	0.0097307	0.0281692	0.0207114	1	%PLTA Wadaslintang - WONOSOBO
4	52	0.0054101	0.0161514	0.0222949	1	%PLTA Mrica - WONOSOBO
4	22	0.0168985	0.0504488	0.0174095	1	%PLTA Mrica - RAWALO
4	37	0.0080982	0.0241764	0.0083431	1	%PLTA Mrica - PURBALINGGA5
5	46	0.0042642	0.0334032	0.0371549	1	%PLTU Rembang KIT - PATI
6	16	0.0063735	0.0184507	0.0135659	1	%PLTA Kedung Ombo - PURWODADI (Pembangkit out of service)
7	8	0.0049174	0.0142353	0.0026166	1	%PLTA Garung - Pembangkit Dieng
7	52	0.0065419	0.0189381	0.0034811	1	%PLTA Garung - WONOSOBO
8	52	0.0113418	0.0328332	0.0060351	1	%PLTP Dieng - WONOSOBO
9	11	0.0024977	0.0181161	0.0262710	1	%PLTU Tambak Lorok - UNGARAN (ada terminal ditengah)
9	71	0.0047369	0.0141414	0.0048801	1	%PLTU Tambak Lorok - KRAPYAK
9	70	0.0022532	0.0067267	0.0023213	1	%PLTU Tambak Lorok - KALISARI
9	68	0.0005282	0.0038312	0.0055559	1	%PLTU Tambak Lorok - PANDEANLAMPER
9	57	0.0033589	0.0386521	0.0140135	1	%PLTU Tambak Lorok - BAWEN
10	60	0.0036731	0.0109657	0.0151367	1	%PLTU Tanjung Jati - JEPARA
11	71	0.0067605	0.0201828	0.0069649	1	%UNGARAN (500kV) - KRAPYAK
11	65	0.0002578	0.0010222	0.0003137	1	%UNGARAN (500kV) - BUMI SEMARANG BARU
12	36	0.0032738	0.0237460	0.0344351	1	%PEDAN - KENTUNGAN
13	21	0.0108382	0.0313755	0.0057672	1	%KESUGIHAN5 - SEMEN NUSANTARA
14	21	0.0026511	0.0076747	0.0014107	1	%LOMANIS (PLTG CLCAP out of service) - SEMEN NUSANTARA
14	13	0.0128658	0.0372451	0.0068461	1	%LOMANIS (PLTG CLCAP out of service) - KESUGIHAN5
15	13	0.0257316	0.0745945	0.0142655	1	%GOMBONG (Pembangkit out of service) - KESUGIHAN5 (ada terminal di tengah)
15	23	0.0164497	0.0476202	0.0087532	1	%GOMBONG (Pembangkit out of service) - KEBUMEN
15	25	0.0325500	0.0942286	0.0173204	1	%GOMBONG (Pembangkit out of service) - PURWOREJO
16	58	0.0096092	0.0278175	0.0204528	1	%PURWODADI (Pembangkit out of service) - KUDUS
16	62	0.0077070	0.0230085	0.0317602	1	%PURWODADI (Pembangkit out of service) - MRANGGEN

Tabel 2 Data Saluran Transmisi (lanjutan)

from bus	to bus	R	X	1/2 B	= 1 for lines	Nama
		p.u.	p.u.	p.u.	> 1 or < 1 for transf. Tap at bus sending	
17	18	0.0038528	0.0301803	0.0335699	1	%NGUNTORONADI - WONOGIRI
18	19	0.0025200	0.0197400	0.0219571	1	%WONOGIRI - WONOSARI
19	30	0.0003704	0.0029015	0.0032273	1	%WONOSARI - SOLOBARU
19	12	0.0033662	0.0097449	0.0071649	1	%WONOSARI - PEDAN
20	27	0.0118864	0.0344099	0.0252999	1	%SEMANU - BANTUL
21	22	0.0039643	0.0287537	0.0104242	1	%SEMEN NUSANTARA - RAWALO
22	39	0.0027957	0.0202778	0.0073514	1	%RAWALO - KALIBAKAL
23	25	0.0161008	0.0466102	0.0085675	1	%KEBUMEN - PURWOREJO
24	25	0.0141615	0.0409961	0.0075356	1	%WATES - PURWOREJO
24	27	0.0192677	0.0557778	0.0102527	1	%WATES - BANTUL
25	27	0.0334755	0.0969079	0.0178129	1	%PURWOREJO - BANTUL
26	27	0.0080440	0.0232866	0.0042804	1	%GODEAN - BANTUL
26	36	0.0055878	0.0161760	0.0029733	1	%GODEAN - KENTUNGAN
27	29	0.0105840	0.0306396	0.0225277	1	%BANTUL - KLATEN
27	36	0.0136318	0.0394626	0.0072537	1	%BANTUL - KENTUNGAN
28	27	0.0012373	0.0018773	0.1051200	1	%WIROBRAJAN - BANTUL
29	12	0.0010953	0.0079444	0.0115206	1	%KLATEN - PEDAN
29	57	0.0055691	0.0403940	0.0585771	1	%KLATEN - BAWEN
30	31	0.0006080	0.0047627	0.0052976	1	%SOLOBARU - PALUR
31	34	0.0032880	0.0095184	0.0069984	1	%PALUR - GONDANGREJO
31	32	0.0143905	0.0416589	0.0076574	1	%PALUR - SRAGEN
32	33	0.0066004	0.0191073	0.0035122	1	%SRAGEN - MASARAN
33	31	0.0075502	0.0218571	0.0040176	1	%MASARAN - PALUR
34	35	0.0040796	0.0118099	0.0086832	1	%GONDANGREJO - JAJAR
35	12	0.0015887	0.0115230	0.0167101	1	%JAJAR - PEDAN
36	41	0.0064774	0.0187512	0.0034467	1	%KENTUNGAN - MEDARI
36	50	0.0230842	0.0668262	0.0122835	1	%KENTUNGAN - SANGGRAHAN
37	22	0.0100375	0.0299661	0.0103410	1	%PURBALINGGA5 - RAWALO
38	22	0.0156944	0.0454336	0.0334050	1	%MAJENANG - RAWALO
39	53	0.0103304	0.0299054	0.0219879	1	%KALIBAKAL - BUMIAYU
40	36	0.0011505	0.0017456	0.0977452	1	%GEJAYAN - KENTUNGAN

Tabel 2 Data Saluran Transmisi (lanjutan)

from bus	to bus	R	X	1/2 B	= 1 for lines	Nama
		p.u.	p.u.	p.u.	> 1 or < 1 for transf. Tap at bus sending	
41	50	0.0166068	0.0480750	0.0088368	1	%MEDARI - SANGGRAHAN
42	35	0.0052669	0.0152471	0.0028026	1	%BANYUDONO - JAJAR
43	35	0.0010827	0.0016427	0.0919800	1	%MANGKUNEGARAN - JAJAR
44	5	0.0016000	0.0125333	0.0139410	1	%REMBANG - Pembangkit Rembang KIT
45	44	0.0023237	0.0182022	0.0202465	1	%BLORA - REMBANG
46	59	0.0017321	0.0135680	0.0150918	1	%PATI - JEKULO5
47	48	0.0090390	0.0261668	0.0192391	1	%MOJOSONGO - BRINGIN
48	49	0.0025506	0.0073838	0.0054289	1	%BRINGIN - JELOK
49	11	0.0050443	0.0146028	0.0104720	1	%JELOK - UNGARAN
49	50	0.0128713	0.0372610	0.0273961	1	%JELOK - SANGGRAHAN
50	57	0.0065687	0.0476441	0.0172727	1	%SANGGRAHAN - BAWEN
50	51	0.0007818	0.0036276	0.0077329	1	%SANGGRAHAN - SECANG DOUBLE (triple circuit)
51	57	0.0055639	0.0403559	0.0146305	1	%SECANG DOUBLE (triple circuit) - BAWEN
51	52	0.0321767	0.0931481	0.0171218	1	%SECANG DOUBLE (triple circuit) - WONOSOBO
52	56	0.0189151	0.0547572	0.0100651	1	%WONOSOBO - TEMANGGUNG(1)
53	63	0.0269531	0.0780262	0.0143422	1	%BUMIAYU - KEBASEN
54	63	0.0043383	0.0125590	0.0092340	1	%BREBES - KEBASEN
55	53	0.0149032	0.0431430	0.0079302	1	%BALAPULANG - BUMIAYU
56	51	0.0132616	0.0383909	0.0070567	1	%TEMANGGUNG(1) - SECANG DOUBLE (triple circuit)
57	11	0.0007122	0.0051655	0.0074907	1	%BAWEN - UNGARAN
58	61	0.0051964	0.0155134	0.0214141	1	%KUDUS - SAYUNG
59	61	0.0008953	0.0070130	0.0078007	1	%JEKULO5 - KUDUS
60	58	0.0040680	0.0121446	0.0167640	1	%JEPARA - KUDUS
61	9	0.0018279	0.0054570	0.0075326	1	%SAYUNG - Pembangkit Tambak Lorok
62	11	0.0024736	0.0073847	0.0101936	1	%MRANGGEN - UNGARAN
63	55	0.0121753	0.0352463	0.0064787	1	%KEBASEN - BALAPULANG
64	63	0.0086063	0.0249144	0.0183183	1	%PEMALANG - KEBASEN
65	71	0.0024669	0.0097827	0.0030016	1	%BUMI SEMARANG BARU - KRAPYAK
66	71	0.0040016	0.0115842	0.0085173	1	%SRONDOL - KRAPYAK
66	68	0.0024493	0.0070903	0.0052132	1	%SRONDOL - PANDEANLAMPER
67	11	0.0032710	0.0112447	0.0103800	1	%PUDAKPAYUNG - UNGARAN (ada terminal di tengah)

Tabel 2 Data Saluran Transmisi (lanjutan)

from bus	to bus	R	X	1/2 B	= 1 for lines	Nama
		p.u.	p.u.	p.u.	> 1 or < 1 for transf. Tap at bus sending	
68	67	0.0043749	0.0126648	0.0093118	1	%PANDEANLAMPER - PUDAKPAYUNG
69	68	0.0012315	0.0018685	0.0261568	1	%SIMPANGLIMA - PANDEANLAMPER
70	71	0.0026408	0.0078837	0.0027206	1	%KALISARI - KRAPYAK
71	72	0.0007807	0.0023891	0.0017526	1	%KRAPYAK - RANDUGARUT
72	73	0.0030577	0.0093574	0.0068644	1	%RANDUGARUT - KALIWUNGU
73	74	0.0066826	0.0193453	0.0142236	1	%KALIWUNGU - WLERI
74	75	0.0105125	0.0304324	0.0223754	1	%WLERI - BATANG
75	76	0.0040074	0.0116010	0.0085296	1	%BATANG - PEKALONGAN
76	64	0.0093528	0.0270754	0.0199072	1	%PEKALONGAN - PEMALANG
77	45	0.0091416	0.0264638	0.0194575	1	%CEPU - BLORA

**BaseMVA* = 100 MVA

BasekV = 150 kV

Toleransi error maksimum = 10^{-9}

iterasi maksimum Newton Raphson power flow = 100 iterasi

LAMPIRAN 2 HASIL ALIRAN DAYA SISTEM TRANSMISI 150kV REGION 3 JAWA TENGAH

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method

Maximum Power Mismatch = 2.1827e-13

No. of Iterations = 11

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	----- Load -----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	0.980	9.688	0.000	0.000	282.980	56.642	0.000
2	1.005	-0.485	0.000	0.000	568.000	270.002	0.000
3	0.951	-4.368	8.000	2.000	0.000	0.000	0.000
4	0.970	-3.117	24.000	4.000	18.000	0.000	0.000
5	1.045	3.700	0.000	0.000	281.000	118.822	0.000
6	1.008	0.351	0.000	0.000	20.000	2.000	0.000
7	0.967	-3.177	0.000	0.000	25.000	4.000	0.000
8	0.967	-3.202	15.000	4.000	22.000	2.000	0.000
9	1.016	0.133	35.000	7.000	520.000	160.335	0.000
10	1.029	4.501	38.000	44.000	334.000	63.609	0.000
11	1.020	0.000	50.000	14.000	846.699	489.031	0.000
12	0.960	-2.536	49.000	18.000	694.157	313.176	0.000
13	0.977	-2.361	20.000	7.000	0.000	0.000	0.000
14	0.986	-1.777	27.000	9.000	0.000	0.000	0.000
15	0.944	-4.788	41.000	15.000	0.000	0.000	0.000
16	1.006	0.150	70.000	30.000	0.000	0.000	0.000
17	0.955	4.588	15.000	4.000	0.000	0.000	0.000
18	0.940	-0.451	44.000	15.000	0.000	0.000	0.000
19	0.938	-3.265	29.000	11.000	0.000	0.000	0.000
20	0.927	-5.900	42.000	16.000	0.000	0.000	0.000
21	0.989	-1.551	21.000	14.000	0.000	0.000	0.000
22	0.983	-2.312	16.000	5.000	0.000	0.000	0.000
23	0.940	-5.136	14.000	5.000	0.000	0.000	0.000
24	0.936	-5.404	23.000	8.000	0.000	0.000	0.000
25	0.941	-5.107	45.000	13.000	0.000	0.000	0.000
26	0.941	-4.943	23.000	11.000	0.000	0.000	0.000
27	0.938	-5.073	74.000	23.000	0.000	0.000	0.000
28	0.938	-5.098	28.000	11.000	0.000	0.000	0.000
29	0.962	-2.906	48.000	19.000	0.000	0.000	0.000
30	0.932	-3.918	57.000	17.000	0.000	0.000	0.000

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	----- Load -----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
31	0.926	-4.829	122.000	40.000	0.000	0.000	0.000
32	0.896	-6.920	131.000	55.000	0.000	0.000	0.000
33	0.904	-6.387	73.000	24.000	0.000	0.000	0.000
34	0.930	-4.719	48.000	20.000	0.000	0.000	0.000
35	0.940	-4.268	63.000	20.000	0.000	0.000	0.000
36	0.946	-4.655	79.000	22.000	0.000	0.000	0.000
37	0.973	-2.994	33.000	10.000	0.000	0.000	0.000
38	0.965	-3.172	40.000	25.000	0.000	0.000	0.000
39	0.966	-4.179	72.000	35.000	2.800	0.000	0.000
40	0.945	-4.727	80.000	23.000	0.000	0.000	0.000
41	0.952	-4.488	38.000	10.000	0.000	0.000	0.000
42	0.933	-4.713	53.000	24.000	0.000	0.000	0.000
43	0.939	-4.315	60.000	23.000	0.000	0.000	0.000
44	1.037	2.994	52.000	20.000	0.000	0.000	0.000
45	1.032	2.439	33.000	14.000	0.000	0.000	0.000
46	1.016	0.823	95.000	41.000	0.000	0.000	0.000
47	0.976	-3.041	72.000	26.000	0.000	0.000	0.000
48	0.990	-2.063	67.000	22.000	0.000	0.000	0.000
49	0.997	-1.539	0.000	0.000	4.600	0.800	0.000
50	0.977	-3.050	93.000	31.000	0.000	0.000	0.000
51	0.978	-2.983	30.000	11.000	0.000	0.000	0.000
52	0.965	-3.417	17.000	8.000	0.000	0.000	0.000
53	0.918	-8.122	22.000	7.000	0.000	0.000	0.000
54	0.867	-13.444	65.000	21.000	0.000	0.000	0.000
55	0.887	-11.122	35.000	12.000	0.000	0.000	0.000
56	0.969	-3.442	24.000	10.000	0.000	0.000	0.000
57	1.007	-0.782	51.000	18.000	0.000	0.000	0.000
58	1.009	1.086	98.000	41.000	0.000	0.000	0.000
59	1.012	0.297	44.000	20.000	0.000	0.000	0.000
60	1.017	2.763	49.000	20.000	0.000	0.000	0.000
61	1.012	0.186	126.000	44.000	0.000	9.000	0.000
62	1.015	-0.094	49.000	21.000	0.000	0.000	0.000
63	0.873	-12.894	103.000	44.000	0.000	0.000	25.000
64	0.878	-12.879	76.000	15.000	0.000	0.000	0.000
65	1.019	-0.068	21.000	8.000	0.000	0.000	0.000

66	1.011	-0.470	34.000	13.000	0.000	0.000	0.000
67	1.021	-0.270	23.000	9.000	0.000	77.000	0.000
68	1.014	-0.258	81.000	28.000	0.000	0.000	0.000
69	1.013	-0.303	60.000	25.000	0.000	0.000	0.000
70	1.012	-0.322	59.000	19.000	0.000	0.000	0.000
71	1.009	-0.627	20.000	6.000	0.000	0.000	0.000
72	1.004	-1.067	36.000	12.000	0.000	0.000	0.000
73	0.984	-2.657	37.000	14.000	0.000	0.000	0.000
74	0.951	-5.730	43.000	11.000	0.000	4.000	0.000
75	0.909	-10.144	54.000	18.000	0.000	0.000	25.000
76	0.896	-11.467	92.000	29.000	0.000	0.000	25.000
77	1.027	2.102	27.000	10.000	0.000	0.000	0.000
Total			3.536.000	1.305.000	3.619.236	1.570.417	75.000
Total loss					83.236	340.417	

LAMPIRAN 3 HASIL ALIRAN DAYA SISTEM TRANSMISI 150kV REGION 4 JAWA TIMUR

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method

Maximum Power Mismatch = 7.55608e-10

No. of Iterations = 4

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	0.999	-8.434	31.238	13.492	0.000	0.000	0.000
2	0.998	-8.704	63.757	34.400	0.000	0.000	0.000
3	0.998	-9.074	46.144	23.780	0.000	0.000	0.000
4	0.999	-8.681	54.310	20.981	0.000	0.000	0.000
5	1.000	-10.439	190.319	78.727	34.000	205.201	30.000
6	0.998	-7.089	80.707	32.582	0.000	0.000	0.000
7	0.997	-8.618	34.013	11.775	0.000	0.000	0.000
8	1.000	-1.803	729.401	242.990	539.980	-285.584	350.000
9	0.995	-9.220	57.736	30.692	0.000	0.000	0.000
10	1.005	-2.102	27.947	7.215	0.000	0.000	0.000
11	0.993	-7.946	171.018	70.749	0.000	0.000	0.000
12	0.998	-7.110	27.801	11.082	0.000	0.000	0.000
13	0.994	-7.389	72.238	30.923	0.000	0.000	0.000
14	0.998	-8.750	26.981	14.862	0.000	0.000	0.000
15	0.999	-8.143	73.058	29.840	0.000	0.000	0.000
16	0.999	-8.686	116.497	49.154	0.000	0.000	0.000
17	1.007	-3.491	15.080	8.106	0.000	0.000	0.000
18	0.999	-2.368	63.420	19.336	0.000	0.000	0.000
19	1.000	-8.242	9.750	4.069	0.000	81.776	0.000
20	0.999	-5.891	58.073	24.675	0.000	0.000	0.000
21	1.000	-5.583	10.065	3.896	339.960	-56.188	0.000
22	1.000	-7.826	0.000	0.000	853.680	-118.788	0.000
23	1.000	-8.174	0.000	0.000	776.000	386.626	0.000
24	0.999	-9.287	0.313	0.019	0.000	0.000	0.000
25	0.999	-8.136	77.820	11.111	0.000	0.000	0.000
26	0.998	-10.565	25.071	11.789	0.000	0.000	0.000
27	1.003	-2.795	99.567	35.641	0.000	0.000	50.000
28	0.999	-8.350	53.659	27.604	0.000	0.000	0.000
29	0.999	-8.640	17.770	7.763	0.000	0.000	0.000
30	1.000	-7.219	186.021	74.550	20.000	123.772	50.000

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
31	0.999	-10.481	20.050	8.384	0.000	0.000	0.000
32	0.989	-8.833	70.047	33.419	0.000	0.000	0.000
33	0.999	-9.296	71.535	18.386	0.000	0.000	0.000
34	0.997	-10.587	96.702	48.440	0.000	0.000	0.000
35	1.008	-3.471	22.600	6.060	0.000	0.000	0.000
36	0.997	-8.300	58.567	33.073	0.000	0.000	0.000
37	0.999	-8.187	37.750	15.673	0.000	0.000	0.000
38	0.999	-8.468	37.877	21.471	0.000	0.000	0.000
39	0.999	-7.177	30.946	12.496	0.000	0.000	25.000
40	1.003	-3.172	57.130	17.922	0.000	0.000	0.000
41	1.000	-10.820	166.219	68.227	1.900	73.001	65.000
42	0.992	-9.806	92.418	10.763	0.000	0.000	0.000
43	0.999	-9.287	19.500	7.273	0.000	0.000	25.000
44	1.000	-8.719	42.662	17.922	0.000	0.000	0.000
45	0.989	-8.825	27.138	13.968	0.000	0.000	0.000
46	1.000	-10.824	53.018	23.087	0.000	0.000	0.000
47	0.998	-9.228	3.954	1.890	0.000	0.000	0.000
48	0.998	-8.857	32.011	17.077	0.000	0.000	0.000
49	0.999	-8.499	18.033	5.583	0.000	0.000	0.000
50	1.000	-10.804	12.297	1.994	0.000	0.000	0.000
51	1.020	0.000	0.000	0.000	2.356.583	299.951	0.000
52	1.000	-7.063	30.373	10.534	0.000	0.000	0.000
53	0.994	-9.135	44.706	13.780	0.000	0.000	25.000
54	1.000	-8.162	7.402	4.430	0.000	177.211	0.000
55	0.999	-8.434	43.512	25.343	0.000	0.000	0.000
56	0.999	-6.525	23.679	10.418	0.000	0.000	0.000
57	1.000	-10.782	15.995	3.492	150.000	-17.542	0.000
58	1.007	-3.641	56.253	22.222	0.000	0.000	0.000
59	0.999	-6.890	16.167	3.857	0.000	0.000	0.000
60	0.999	-5.944	32.125	14.795	0.000	0.000	0.000
61	0.997	-8.209	178.915	71.426	0.000	0.000	0.000
62	0.994	-9.116	39.000	12.150	0.000	0.000	0.000
63	0.999	-8.171	37.596	19.783	0.000	0.000	0.000
64	0.999	-8.422	46.205	18.609	0.000	0.000	0.000
65	1.000	-8.691	204.361	96.217	19.000	603.656	0.000

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
66	1.000	-7.281	93.411	38.729	8.000	36.549	25.000
67	0.988	-8.901	46.234	21.673	0.000	0.000	0.000
68	1.011	-0.884	42.604	15.230	0.000	0.000	0.000
69	0.989	-8.821	77.663	35.251	0.000	0.000	0.000
70	0.993	-9.181	24.330	6.782	0.000	0.000	0.000
71	0.999	-8.622	49.997	24.848	0.000	0.000	0.000
72	0.997	-8.222	27.340	11.775	0.000	0.000	0.000
73	1.000	-10.533	20.409	11.163	0.000	0.000	0.000
74	1.000	-7.191	0.000	0.000	54.250	-15.048	0.000
75	0.999	-8.120	91.872	32.568	0.000	0.000	0.000
76	1.000	-9.254	0.000	0.000	0.000	149.478	0.000
77	1.002	-3.030	36.461	9.783	0.000	0.000	0.000
78	0.999	-9.283	51.715	27.820	0.000	0.000	25.000
79	0.998	-9.384	66.294	4.744	0.000	0.000	0.000
80	0.989	-8.831	27.610	12.987	0.000	0.000	0.000
81	0.997	-8.255	21.410	10.649	0.000	0.000	0.000
82	0.999	-8.129	144.688	66.115	0.000	0.000	0.000
83	1.000	-7.370	79.674	29.090	44.000	30.026	10.000
84	0.989	-8.826	57.197	29.234	0.000	0.000	0.000
Total			5.125.427	2.030.404	5.197.353	1.674.097	680.000
Total Loss					71.926	323.693	

LAMPIRAN 4 HASIL ALIRAN DAYA SISTEM TRANSMISI 150kV REGION 4 JAWA TIMUR SUPERPOSISI PLTU PACITAN

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method

Maximum Power Mismatch = 6.46964e-12

No. of Iterations = 4

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.018	-1.123	0.910	-0.109	0.000	0.000	0.000
2	1.018	-1.098	1.858	-0.278	0.000	0.000	0.000
3	1.018	-1.143	1.345	-0.192	0.000	0.000	0.000
4	1.018	-1.091	1.583	-0.170	0.000	0.000	0.000
5	1.019	-0.561	5.547	-0.637	0.000	0.000	0.173
6	1.018	-1.181	2.352	-0.264	0.000	0.000	0.000
7	1.018	-1.147	0.991	-0.095	0.000	0.000	0.000
8	1.018	-1.362	21.260	-1.965	0.000	0.000	2.022
9	1.018	-1.148	1.683	-0.248	0.000	0.000	0.000
10	1.018	-1.318	0.815	-0.058	0.000	0.000	0.000
11	1.018	-1.173	4.985	-0.572	0.000	0.000	0.000
12	1.018	-1.183	0.810	-0.090	0.000	0.000	0.000
13	1.018	-1.190	2.105	-0.250	0.000	0.000	0.000
14	1.018	-1.099	0.786	-0.120	0.000	0.000	0.000
15	1.018	-1.134	2.129	-0.241	0.000	0.000	0.000
16	1.018	-1.097	3.396	-0.398	0.000	0.000	0.000
17	1.018	-1.253	0.440	-0.066	0.000	0.000	0.000
18	1.018	-1.352	1.848	-0.156	0.000	0.000	0.000
19	1.018	-1.136	0.284	-0.033	0.000	0.000	0.000
20	1.018	-1.207	1.693	-0.200	0.000	0.000	0.000
21	1.018	-1.207	0.293	-0.032	0.000	0.000	0.000
22	1.018	-1.127	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000
23	1.018	-1.134	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000
24	1.018	-1.149	0.009	-0.000	0.000	0.000	0.000
25	1.018	-1.138	2.268	-0.090	0.000	0.000	0.000
26	1.019	-0.566	0.731	-0.095	0.000	0.000	0.000
27	1.018	-1.316	2.902	-0.288	0.000	0.000	0.289
28	1.018	-1.121	1.564	-0.223	0.000	0.000	0.000
29	1.018	-1.096	0.518	-0.063	0.000	0.000	0.000
30	1.018	-1.210	5.422	-0.603	0.000	0.000	0.289

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
31	1.019	-0.563	0.584	-0.068	0.000	0.000	0.000
32	1.018	-1.158	2.042	-0.270	0.000	0.000	0.000
33	1.018	-1.149	2.085	-0.149	0.000	0.000	0.000
34	1.019	-0.567	2.819	-0.392	0.000	0.000	0.000
35	1.018	-1.252	0.659	-0.049	0.000	0.000	0.000
36	1.018	-1.133	1.707	-0.268	0.000	0.000	0.000
37	1.018	-1.129	1.100	-0.127	0.000	0.000	0.000
38	1.018	-1.127	1.104	-0.174	0.000	0.000	0.000
39	1.018	-1.192	0.902	-0.101	0.000	0.000	0.144
40	1.018	-1.295	1.665	-0.145	0.000	0.000	0.000
41	1.020	-0.045	4.845	-0.552	0.000	0.000	0.376
42	1.018	-1.129	2.694	-0.087	0.000	0.000	0.000
43	1.018	-1.149	0.568	-0.059	0.000	0.000	0.144
44	1.018	-1.077	1.243	-0.145	0.000	0.000	0.000
45	1.018	-1.158	0.791	-0.113	0.000	0.000	0.000
46	1.020	-0.045	1.545	-0.187	0.000	0.000	0.000
47	1.018	-1.147	0.115	-0.015	0.000	0.000	0.000
48	1.018	-1.090	0.933	-0.138	0.000	0.000	0.000
49	1.018	-1.128	0.526	-0.045	0.000	0.000	0.000
50	1.020	-0.001	0.358	-0.016	0.000	0.000	0.000
51	1.018	-1.289	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000
52	1.018	-1.208	0.885	-0.085	0.000	0.000	0.000
53	1.018	-1.162	1.303	-0.111	0.000	0.000	0.144
54	1.018	-1.128	0.216	-0.036	0.000	0.000	0.000
55	1.018	-1.126	1.268	-0.205	0.000	0.000	0.000
56	1.018	-1.197	0.690	-0.084	0.000	0.000	0.000
57	1.020	0.000	0.466	-0.028	150.012	-17.518	0.000
58	1.018	-1.250	1.640	-0.180	0.000	0.000	0.000
59	1.018	-1.204	0.471	-0.031	0.000	0.000	0.000
60	1.018	-1.208	0.936	-0.120	0.000	0.000	0.000
61	1.018	-1.140	5.215	-0.578	0.000	0.000	0.000
62	1.018	-1.162	1.137	-0.098	0.000	0.000	0.000
63	1.018	-1.128	1.096	-0.160	0.000	0.000	0.000
64	1.018	-1.126	1.347	-0.151	0.000	0.000	0.000
65	1.018	-1.085	5.956	-0.778	0.000	0.000	0.000

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
66	1.018	-1.212	2.723	-0.313	0.000	0.000	0.144
67	1.018	-1.160	1.348	-0.175	0.000	0.000	0.000
68	1.018	-1.316	1.242	-0.123	0.000	0.000	0.000
69	1.018	-1.158	2.264	-0.285	0.000	0.000	0.000
70	1.018	-1.164	0.709	-0.055	0.000	0.000	0.000
71	1.018	-1.095	1.457	-0.201	0.000	0.000	0.000
72	1.018	-1.141	0.797	-0.095	0.000	0.000	0.000
73	1.019	-0.476	0.595	-0.090	0.000	0.000	0.000
74	1.018	-1.214	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000
75	1.018	-1.127	2.678	-0.263	0.000	0.000	0.000
76	1.018	-1.148	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000
77	1.018	-1.313	1.063	-0.079	0.000	0.000	0.000
78	1.018	-1.149	1.507	-0.225	0.000	0.000	0.144
79	1.018	-1.152	1.932	-0.038	0.000	0.000	0.000
80	1.018	-1.158	0.805	-0.105	0.000	0.000	0.000
81	1.018	-1.131	0.624	-0.086	0.000	0.000	0.000
82	1.018	-1.138	4.217	-0.535	0.000	0.000	0.000
83	1.018	-1.224	2.322	-0.235	0.000	0.000	0.058
84	1.018	-1.158	1.667	-0.236	0.000	0.000	0.000
Total			149.390	-16.423	150.012	-17.518	3.929
Total Loss					0.622	2.834	

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Dheny Ashari HS, lahir di Surabaya pada tanggal 30 Juli 1994. Merupakan anak ke-1 dari 2 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD HANGTUAH 8 Surabaya, lulus pada 2006, dan menempuh pendidikan tingkat menengah di SMPN 16 Surabaya, lulus pada 2009, serta lulus dari SMAN 15 Surabaya pada tahun 2012, kemudian melanjutkan pendidikan Sarjana di Jurusan Teknik Elektro, FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Bekerja sama selama 2 tahun dengan Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga sebagai Asisten dan Koordinator Praktikum, sejak 2015. Selama Perkuliahan, Penulis telah melakukan 4 publikasi ilmiah internasional, pada APPEMSE 2016, ISITIA 2016, ICNERE EECCiS 2016 dan IREACO 2017. Ketertarikan Bidang penelitian terkait aplikasi kecerdasan buatan, kestabilan sistem tenaga, dan analisa sistem tenaga.

Email : dheny3007@gmail.com

No. HP : +6285785480233

Halaman ini sengaja dikosongkan